

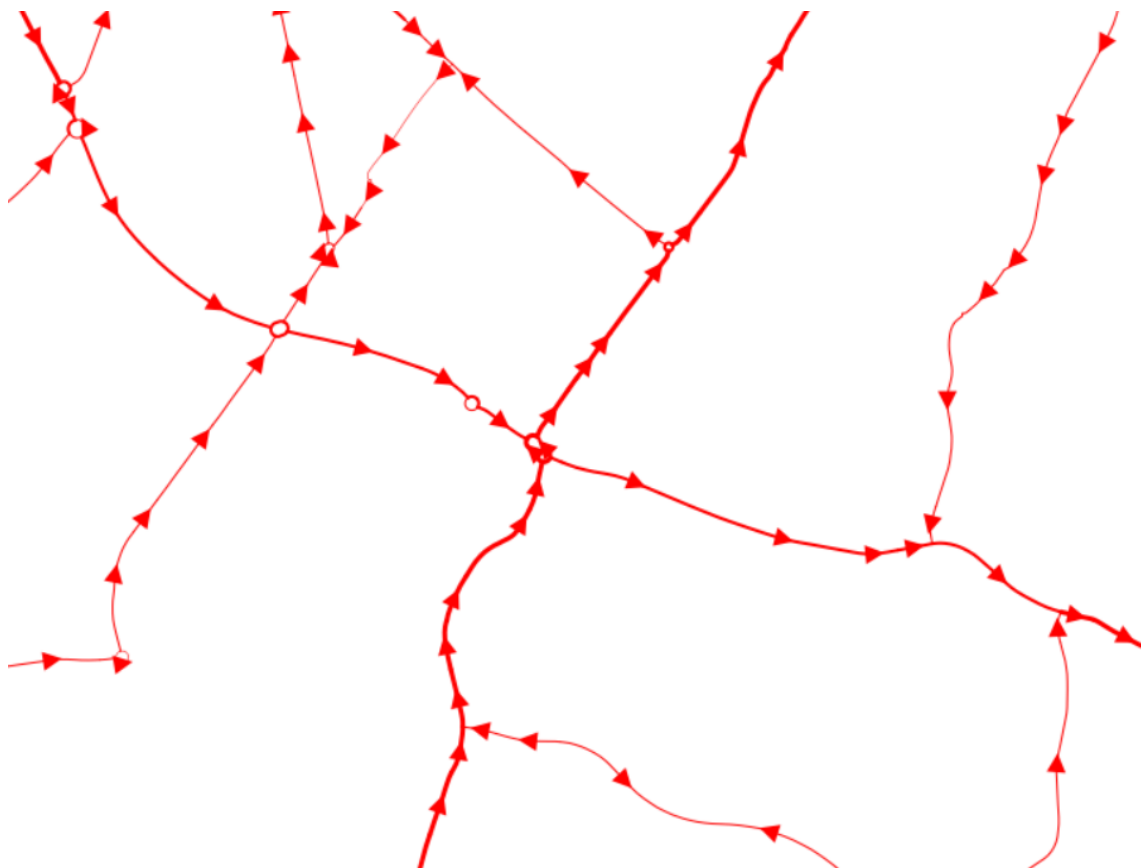
Bachelor Arbeit

Bedarfsgerechte Optimierung der Veloinfrastruktur Uster

Autor: Cyrano Gollierz ETH-Nr. 15-914-609

Supervisors: Prof. Dr. Bryan T. Adey
Dr. Claudio Martani

Date: 29.05.2020





Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

Declaration of originality

The signed declaration of originality is a component of every semester paper, Bachelor's thesis, Master's thesis and any other degree paper undertaken during the course of studies, including the respective electronic versions.

Lecturers may also require a declaration of originality for other written papers compiled for their courses.

I hereby confirm that I am the sole author of the written work here enclosed and that I have compiled it in my own words. Parts excepted are corrections of form and content by the supervisor.

Title of work (in block letters):

Authored by (in block letters):

For papers written by groups the names of all authors are required.

Name(s):

First name(s):

With my signature I confirm that

- I have committed none of the forms of plagiarism described in the '[Citation etiquette](#)' information sheet.
- I have documented all methods, data and processes truthfully.
- I have not manipulated any data.
- I have mentioned all persons who were significant facilitators of the work.

I am aware that the work may be screened electronically for plagiarism.

Place, date

Signature(s)

For papers written by groups the names of all authors are required. Their signatures collectively guarantee the entire content of the written paper.

Acknowledgment

Acknowledgments are the author's statement of gratitude to and recognition of the people and institutions that helped the author's research and writing.

For example, the supervisor, other academic and/or technical staff at the university, experts in other institutions who may have provided advice or access to information, funding bodies, colleges, friends and family.

Abstract

look at

The abstract is a concise and accurate summary of the research described in the document. It states the problem, the methods of investigation, and the general conclusions, and should not contain tables, graphs, complex equations, or illustrations. There is a single abstract for the entire work, and it must not exceed 350 words in length.

The abstract should be given in both English and German language, independent of the language in which the thesis itself is written.

This is some real bullshit man.

Zusammenfassung

Hier wird die gesamte Arbeit kurz zusammengefasst.

This is some real bullshit man.

Hilfestellung

Some formal aspects

Strong demands can only be met with the help of a very stringent and clear structure laid out at the beginning of the writing process. One of the most clear structuring is given by a rigorous "legal numbering" (1, 1.1, 1.1.1 etc.). It is good to know that \LaTeX does all this formatting business without any need to renumber things yourself at each iteration and so on. Thus we strongly recommend using \LaTeX for the project. Anything else (e.g. Word) is a mess when writing an elaborate scientific text with many graphics and formulas.

Even a particular elusive reader should be able to quickly glean the most important thoughts, experiments and results from just looking at illustrative schematics, diagrams, and pictures with self explaining, extensive figure captions.

There are always parts/chapters/sections of text which are complex and important for a full description and documentation of the work, but not absolutely necessary for following the main lines of thought. It is very helpful for the somewhat more interested, but temporally limited reader if such passages of text are correspondingly marked, e.g. by a brief introductory remark to such sections, or even by moving them into appendices.

Definitively each chapter and ideally also each section should begin with a short guide: what is communicated in the following text, which sources (quote clearly) have been used, what are the basic concepts used and which goals are to be reached. Similarly, at the end of larger elaborations a short synopsis of the communicated content should be offered.

Plain text

A single font must be used throughout the thesis or report, the only exceptions being in tables, graphs, and appendices. Headings may be bolded and no more than 2 points larger than the rest of the text.

The page format should be single column with one and a single spacing used between the lines. Spacing of words on a line should be such that the line can be easily read. Crowding words together or leaving excessive spaces is not permitted.

Footnotes

For those who are using footnotes¹, Arabic numerals are used consecutively throughout a chapter, and should normally appear at the bottom of the relevant page, keyed to the same number following the word or phrase in the text to which it refers. If a footnote is too long for the relevant page, it may be continued on the following page preceding the footnotes for that page. If the number of footnotes is very large, numbers may be restarted with each chapter.

Lists

There are three types of lists with the environment names *itemize*, *enumerate* and *description*. All lists have a separation between each item, to improve the reading of item texts spanning several lines. This item text can contain multiple paragraphs. These paragraphs are appropriately spaced and indented according to their position in the list.

- The *itemize* sets off list items with *bullets*, like this.
- Of course, lists can be nested, each type up to at least four levels. One type of list can be nested within another type.
 - Nested lists of the same type will change style of numbering or *bullets* as needed.

1. The *enumerate* environment numbers the list elements.

This is a new paragraph in the item text, which is not intended as in the normal text but separated from the previous paragraph.

2. The enumeration scheme changes with each nesting level
 - a) as shown in this nested enumerated list item.

Some description The *description* environment allows to describe some content.

Mathematical symbols and equations

Each formula, except for generally accepted and well-known formulas, either has to be mathematically derived, to be explained, or a literature source has to be provided. This applies especially to complex models, where each constraint should be described and explained.

There are three types of mathematical equations: (a) in-line equations, (b) displayed but unnumbered equations, and (c) displayed and numbered equations.

1. Some example footnote.

In-line equations

An in-line equation is used for particularly simple relationships which (i) do not need vertical space for integrals, fractions, etc., (ii) can be expressed without breaking the flow of the sentence, and (iii) will not be referenced again in the document.

For example:

If volume V and temperature T are known, the ideal gas law can be used to get a reasonable approximation for the pressure of a gas as $P = nRT/V$, where n is the number of moles of gas and R is the gas constant.

Unless all the variables have been defined earlier in the document, the physical significance of all the quantities appearing in an equation must be stated at the point of their first appearance in the document.

Displayed, but unnumbered, equations

Equations that are too complex to be written as in-line equations should be "displayed", which usually means, that the equation is centered between the left and right margins or aligned at a tab stop with some indent from the left margin and some vertical space is provided above and below the equation to set it apart from the text.

For example:

The van der Waals equation is used to provide a more accurate expression for the pressure P as a function of the molar volume V_m and the temperature T as

$$P = \frac{RT}{V_m - b} - \frac{a}{V_m^2} ,$$

where a and b are van der Waals parameters for the gas.

or

The electric field \mathbf{E} at the origin due to a point charge q at a distance r is given by

$$\mathbf{E} = \frac{|q|}{4\pi\epsilon_0 r^2} \hat{\mathbf{r}}$$

where $\hat{\mathbf{r}}$ is the position vector of the point charge.

Note that in the examples presented above, the displayed equation is part of the text, i.e., it is punctuated, and incorporated in to the structure of the sentence.

All the scalar variables are italicized whereas the vector quantities in the second example are Roman boldfaced.

Displayed and numbered equations

One often has to refer back to the important equations. The standard way to do this is by referring to the equation number. Of course, in order to refer to an equation number, one must first number the equations. A consistent system of numbering equations must be adopted. Various options are:

- Number equations as (1), (2), etc., starting in Chapter 1 (or at the first numbered equation) and continuing until the end of the last numbered equation in the document.
- Incorporate the chapter number into the equation, as in (1.1), (2.3), (4.6), etc., which means the equation numbering goes back to 1 at the beginning of each chapter.
- Use Roman numerals for chapter numbers, as in (I.1), (II.3), (IV.6) etc.

For example:

The non-relativistic Schrödinger equation for a particle of mass m subject to a potential energy function $V(x)$ in a one-dimensional universe is

$$E\psi(x) = \frac{-\hbar^2}{2m} \frac{d^2\psi}{dx^2} + V(x)\psi(x) \quad (0.1)$$

where $\hbar = h/(2\pi)$, h is Planck's constant, and E is the total energy of the system.

The equation in the example is approximately centered on the page, and the equation number is aligned by a right-tab at the right margin.

To cite an equation in text, use an abbreviation if it is not the first word of the sentence. Suitable singular and plural abbreviations include eq. and eqs., Eq. and Eqs. Spell out "Equation" when it is the first word of a sentence and when it is not accompanied by a number.

The used numbering of the equation may change according to the context of the work. E.g. number them as subequations

$$\dot{q}_i = \frac{\partial H}{\partial p_i} \quad (0.2a)$$

$$\dot{p}_i = -\frac{\partial H}{\partial q_i} \quad (0.2b)$$

or with only a single number

$$\begin{aligned} \dot{q}_i &= \frac{\partial H}{\partial p_i} \\ \dot{p}_i &= -\frac{\partial H}{\partial q_i} \end{aligned} \quad (0.3)$$

Many further possibilities of displaying equations exist.

Tables

Tables should only be used to present three (3) or more items; otherwise, the data should be described in the narrative. Tables should be arranged so like material appears in columns, not rows. Information presented in tables should be sufficiently understandable so frequent reference to the narrative is unnecessary. Each table should have a title, generally appearing above the table itself. The table title and other items may be footnoted, although extensive explanations appearing in footnotes should be avoided. All abbreviations and symbols should be defined.

Tables are generally no more than what can be printed on one page, but occasionally multi-paged tables are necessary and are acceptable. Tables may appear on pages which contain narrative text or tables may appear singularly on a page (i.e. one table per page and only the table on the page).

Tabelle 0.1: Comparison of the mean-field predictions for the critical temperature of the Ising model with exact results and the best known estimates for different spatial dimensions d and lattice symmetries.

lattice	d	q	T_{mf}/T_c
square	2	4	1.763
triangular	2	6	1.648
diamond	3	4	1.479
simple cubic	3	6	1.330
bcc	3	8	1.260
fcc	3	12	1.225

Figures

Figures present charts, graphs, or images to the reader. Figure legends should be sufficiently detailed to allow the reader to understand without frequent reference to the narrative. However, overly detailed descriptions should be avoided. All abbreviations and symbols should be defined. Figure legends should appear on the same page and in the same orientation as the figure. For example, if the figure appears in landscape mode then the legend should also appear in landscape mode. If the figure legend is too lengthy to appear on the same page as the figure, then the legend, in its entirety, must appear on the next page.

Similar to tables, figures are usually constructed to be no more than what can appear on one page, but occasionally multi-paged figures are necessary. Figures may also appear singularly on pages or on pages containing narrative text.

All possibilities of grouping pictures side by side, on top or in matrices can be realized. Each subfigure is created in the same way as a graphic inside a figure, just enclosed by a figure environment, as shown in Figure 0.2.

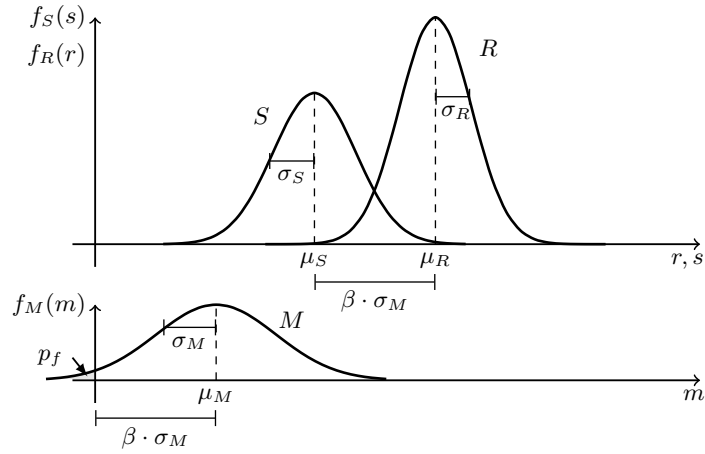


Abbildung 0.1: Safety Margin and Reliability Index. Are the random variables R and S normally distributed also the safety margin M is a normal random variable. In standardised domain the reliability index β provides the information how often σ_M has space between the origin and μ_M .

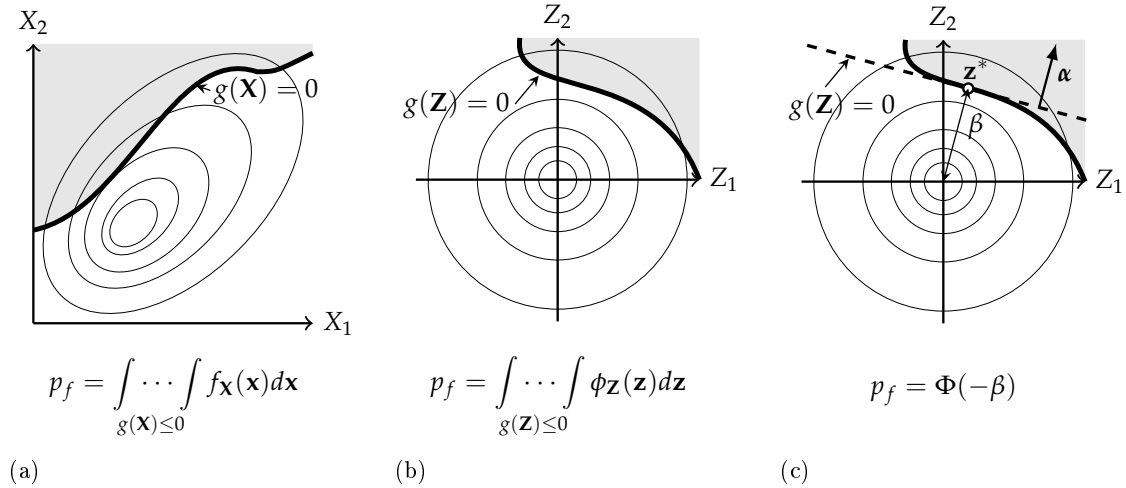


Abbildung 0.2: First Order Reliability Method. (a) Representation of a physical space with a set \mathbf{X} of any two random variables. The shaded area denotes the failure domain and $g(\mathbf{X}) = 0$ the failure surface. (b) After transformation in the normalized space, the random variables \mathbf{Z} are now uncorrelated and standardized normally distributed, also the failure surface is transformed into $g(\mathbf{X}) = 0$. (c) FORM corresponds to a linearization of the failure surface $g(\mathbf{X}) = 0$. Performing this method, the design point \mathbf{z}^* and the reliability index β can be computed.

Citations

Academic work almost always builds upon the work of others, and it is appropriate, indeed essential, that you discuss the related and previous work of others in your thesis. However,

this must be done according to the rules of acceptable use.

Much of the advice in the section on books will pertain to other sources as well. Their long history as a formal publication ensures, in particular, that the variations in author names and titles will serve as a model for constructing documentary notes and bibliography entries for many other types of sources.

The Chicago Manual of Style², implemented here in its 16th edition, has long, been one of the most influential style guides for writers and publishers. While one's choices are now perhaps more extensive than ever, the Manual at least still provides a widely-recognized, and widely-utilized, standard.

A full reference must include enough information to enable an interested reader to locate the book. Most references contain at least some information not strictly needed for that purpose but potentially helpful nonetheless. The elements listed below are included, where applicable, in full documentary notes and bibliography entries.

The author appears as part of the narrative:

Nowak und Collins 2000, p.100 show how to calculate the reliability index β , by using geometric properties. And Chicago Press 2010 shwos us how to eat ass.

Otherwise, in parentheses:

A near linear relationship can be obtained between ultimate flexural and shear capacity of a RC section, if pitting corrosion occurs³.

vlg. Nowak und Collins 2000, 17 Das ist mit Seitenangabe und Vergleich

Nowak und Collins 2000 Das ist sogar sehr doof.

(Nowak und Collins 2000) Das ist ein Test.

2. Chicago Press 2010

3. Stewart 2009.

Inhaltsverzeichnis

Acknowledgment	v
Abstract	vii
Zusammenfassung	ix
Hilfestellung	xi
1 Einleitung	1
2 Grundlagen und Theorie	3
2.1 Problemlösungsprozess	3
2.2 Interessensgruppen	5
2.3 Zielfunktion	5
2.4 Entscheidungsbaum	7
2.5 Sensitivitätsanalyse	8
2.6 Real option methodology	9
3 Vorgehen und Methodik	10
4 Fallstudie	12
4.1 Formulierung der Ziele und Rahmenbedingungen	17
4.1.1 Interessensgruppen	17
4.1.2 Zielfunktion	19
4.2 Kostenstruktur	21
4.2.1 Unsichere Einflussfaktoren	33
4.3 Generierung möglicher Lösungen	34
4.3.1 Variante: 1	34
4.3.2 Variante: 2	34
4.3.3 Variante: 3	34
4.4 Analyse der Lösungen	36
4.4.1 Modellierung des DTV	36
4.4.2 Berechnung der Kosten der Varianten	40
4.5 Bewertung der Lösungen	41
4.5.1 Berechnung der Risiken der Varianten	41
4.5.2 Sensitivitätsanalyse	41
5 Resultate	43
6 Diskussion	44

7 Schlussfolgerung und Ausblick	45
Literaturverzeichnis	46
Anhang	48
A.1 Unfallrisiko Schätzung	48

Abbildungsverzeichnis

0.1	Safety Margin an Reliability Index	xvi
0.2	First Order Reliability Method	xvi
2.1	Schritte des Problemlösungsprozess	3
2.2	Beispiel Entscheidungsbaum	8
4.1	Strassenprojekte im Kantonalen Richtplan	15
4.2	Velonetz Alltag	16
4.3	Bahnübergang Brunnenstrasse	17
4.4	Marktanteil E-Autos	28
4.5	Szenarienübersicht	36
4.6	Verkehrsaufkommen	38
4.7	Kostenberechnung	41
4.8	Risikoberechnung	41
A.1	Unfallrisiko Schätzung	48

Tabellenverzeichnis

0.1	Mean-field predictions for the critical temperature of the Ising model	xv
4.1	Tabelle der Interessensgruppen und Kostenstrukturen	20
4.2	Bau- und Unterhaltskosten	22
4.3	Übersich der Nutzerkosten	25
4.4	Übersich der Nutzerkosten	27
4.5	Tabelle der Unfallrisiken	31
4.6	Übersich der Nutzerkosten	32
4.7	Basis Informationen der Varianten	35

1 Einleitung

Problemstellung gemäss IBI Das Hauptziel dieser Arbeit ist die Optimierung des Velonetzes von Uster, durch das Verbessern eines Teilstücks der Veloinfrastruktur. Für diese Veloinfrastruktur soll eine optimale Variante erarbeitet werden, die, nach der Analyse der momentanen Situation in Uster die zukünftigen Bedürfnisse der Bevölkerung von Uster nach Mobilität am besten befriedigen kann.

Infrastrukturen müssen so gebaut werden, dass sie die Interessen aller beteiligten über einen langen Zeithorizont befriedigen können.

Was ist Aufgabenstellung und Problemstellung

Ich habe mich im Rahmen dieser Fallstudie mit der Frage einer beschäftigt, die Langsamverkehrsinfrastruktur im Zentrum von Uster, trotz unsicherer Zukunft, zu optimieren. Im diese Zielsetzung erreichen zu können, habe ich die Infrastruktur des Bahnübergangs Brunnenstrasse in Abhängigkeit von unsicheren zukünftigen Nachfragebeziehung untersucht und Vorschläge zur Verbesserung der Situation erarbeitet.

Diese wichtige Route verbindet die südlichen Stadteile sowie das Zentrum ideal mit der Sportanlage Buchenhold sowie mit den Institutionen der Gesundheitsmeile auf dem Weg dahin. In der Gegenrichtung verbindet sie die nördlich der Bahngleise gelegenen Quartiere mit dem Zentrum. Dies ist somit eine der zentralen Achsen Usters und ihr ist im Rahmen der Stadtentwicklung besonderes Augenmerk zu schenken, insbesondere im Zuge der Zentrumsentwicklung und der Mobilitätsstrategie 2035.

In enbracht der Bestrebungen aus Uster ein urbanes Regionalzentrum zu machen, ist die Förderung des ökologischen und zukunftsorientierten Langsamverkehr essenziell, insbesondere die Veloförderung. Hinsichtlich der zukünftigen Entwicklung der Mobilität wird das Fahrrad auch auf Strecken bis zu 30km eine entscheidende Rolle bei der Verkehrsmittelwahl spielen. Im Rahmen der Entwicklung des Bahnhofzentrum mit besonderem Augenmerk auf den Fahrbeziehungen der Buslinien, der geplanten Kapazität und Lage der Veloparkieranlagen und der Kapazitäten der Wintethurerstrasse sowie der geplanten Umfahrung Uster West wird die Infrastruktur auf der Nord-Süd Achse zum zentralen Element zur Förderung des Langsamverkehrs. Um diese zentrale Achse und auch das Stadtzentrum vom MIV Durchgangsverkehr zu entlasten ist der Ausbau der Uster Westumfahrung unumgänglich.

Das Ziel der von mir untersuchten Infrastruktur Investitionen ist es den Gesamtnutzen der Interessensverbände zu maximieren.

Dies mit speziellem Augenmerk auf der Vermehrung des Nutzens der Nutzer dieser Infrastruktur, d.h. der Langsamverkehr.

Ich möchte den Nutzen also die Reduktion der Kosten gemäss der Funktionen in diesem Dokument berechnen. Die Funktionen werden ich anhand der Angaben aus dem *STEK* im

1 Einleitung

Rahmen der von mir definierten unsicheren Variablen modellieren.

Die von mir untersuchten Infrastruktur Investitionen werden sich hinsichtlich ihrer Kapazitäten unterscheiden. Einerseits möchte ich untersuchen welche Variante die optimale Vermehrung des Gesamtnutzens ermöglicht und andererseits welche die optimale Kapazität für eine geplante Lebensdauer von mind. 40 Jahren ist.

2 Grundlagen und Theorie

Diese theoretischen Grundlagen sind anhand der Unterrichtsmaterialien des Kurs System Engineering HS 2019 von Prof. Dr. Brayn T. Adey, Dr. Craig Richmond und Dr. Clemens Kielhauser, erarbeitet worden. Der Grossteil der Inforamtionen beziehe ich aus dem Skript zum Kurs. Zur weiteren Vertiefung habe ich die von Dr. Claudio Martani zur Verfügung gestellten Materialien zur Anwendung der *Real option methodology*, konsultiert.

2.1 Problemlösungsprozess

Der Problemlösungsprozess ist eine universell einsetzbare Methodik, zur bestimmung der optimalen Lösung eines Problems. Anhand diesem systematischen Prozess kann gewährleistet werden, dass bei der Optimierung eines Systems alle Aspekte zum richtigen Zeitpunkt berücksichtigt werden. So wird sichergestellt, dass die Bedürfnisse der vom betrachteten System abhängigen Personen befriedigt werden und die Funktionalität der erarbeiteten Lösungsvarianten gewährleistet ist. (Adey 2019)

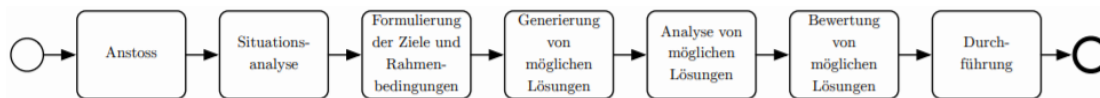


Abbildung 2.1: Schritte des Problemklösungsprozess aus (Adey 2019)

Nachfolgend werden die in Abbildung 2.1 dargestellten Schritte des Problemlösungsprozess, anhand des Skript des Kurs System Engineering, kurz erläutert.

Anstoss In diesem Schritt des Problemlösungsprozess werden die Grenzen und wirkenden Mechanismen des Problemfelds identifiziert, ein allgemeines Verständnis für das Problem entwickelt und überprüft ob das richtige Problem angegangen wird. Dies erfolgt anhand der differenzierung zwischen Wunsch und Wirklichkeit und der bestimmung des Umfangs der Bedürfnisse nach einer geänderten Situation.

Situationsanalyse Der Zweck einer Situationsanalyse ist einerseits die Basis für die konkretisierung der Ziele zu schaffen und andererseits das Problem und die Notwendigkeit einer Intervention zu identifizieren. Weiter sollen die Zusammenhänge zwischen den Ursachen und dem Problem untersucht werden. Dies erfolgt mit der strukturierten Abgrenzung des Problemfelds und einer detaillierten Darstellung der Ausgangssituation sowie der Aufgabenstellung. Anhand der Begrenzung des Problemfelds, auf den Bereich des Systems der

im Rahmen der Problemlösung optimiert werden soll und der geschaffenen Informationsbasis können die nachfolgenden Schritte durchgeführt werden. Wichtige in diesem Schritt, für die erfolgreiche Optimierung einer Problemstellung ist, die Bestimmung der Diskrepanz zwischen Wunsch und Wirklichkeit.

Formulierung der Ziele und Rahmenbedingungen In diesem Schritt werden alle Ziele, Wünsche und Absichten der beteiligten Personen zusammengetragen und ausführlich beschrieben, was und in welchem Umfang erreicht werden soll. Diese Beschreibung soll möglichst vollständig, realistische und objektiv sowie präzise und verständlich formuliert, sein. Ausserdem muss bei der Formulierung darauf geachtet werden, dass die Erfüllung der Ziele feststellbar und das Setzen von Prioritäten möglich ist. Die Ziele werden in die folgenden Kategorien unterteilt.

Generierung von möglichen Lösungen Unter diesem Stichpunkt werden anhand der folgenden Schritte, mögliche Lösungen für die Erfüllung der Ziele generiert. In einem ersten Schritt wird das neu zugestaltende Objekt genauer untersucht und anschliessend erste Lösungsideen entworfen. In einem zweiten Schritt werden alle als untauglich erachteten Lösungsideen aussortiert und die verbleibenden zu möglichen Lösungsvarianten ausgearbeitet. Zum Erstellen der möglichen Varianten gehört bereits eine erste systematische Analyse und eine darauf folgende Anpassung der Varianten. Das Konkretisierungsniveau der Varianten soll der Planungsphase entsprechen, in der sich das Projekt befindet. Dieser Schritt erfordert viel Kreativität da mit einem vertretbaren Aufwand, eine Visualisierung und Beschreibung der Varianten erschaffen werden muss, die vom neutralen Betrachter verstanden werden kann. Dies bedeutet, dass er das angewandte Konzept, mit dem das Problem gelöst werden soll, erkennen kann.

Analyse von möglichen Lösungen In dieser Phase des Problemlösungsprozesses werden die Lösungsvarianten auf allfällige Schwachstellen überprüft. Dieser Schritt ist insofern sehr wichtig, da er aufzeigt, ob ein Lösungskonzept den gestellten Anforderungen entspricht. Dies erfolgt durch die Überprüfung der Varianten in Hinblick auf die Erfüllung aller Rahmenbedingungen und der Optimierung der Zielfunktion.

Bewertung von möglichen Lösungen Die Bewertung der Lösungen dient dazu, die am besten geeignete Variante zu ermitteln. Durch das systematische Vergleichen der Lösungsvarianten, wird eine objektive Entscheidungsfindung ermöglicht. Eine solche Bewertung erfolgt zum Beispiel mit einer Optimierung oder mithilfe von Entscheidungsbäumen.

Durchführung Die Durchführung schliesst den Problemlösungsprozess ab und beinhaltet die Ausführung der Variante, die im Bewertungsprozess als die beste identifiziert wurde. Die Durchführung ist abhängig von der Phase in der sich das Projekt befindet, was bedeutet, dass die Durchführung z.B. der Start einer Detailstudie (nach der Vorstudie) oder der Bau der Lösungsvarianten (nach der Detailstudie), sein kann.

2.2 Interessensgruppen

Als Interessensgruppen werden die Einzelpersonen, Gruppen oder Organisationen definiert, die von einer Veränderung der öffentlichen Strassen betroffen sind. Die Interessensgruppen können in zwei Stufen unterteilt werden. Die erste Stufe umfasst die Interessensgruppen, deren netto Nutzen maximiert werden soll. Diese beinhaltet zum einen die Besitzer der Infrastruktur, sowie die Nutzer als auch die direkt und indirekt betroffenen Öffentlichkeit. Im Falle der zwei letztgenannten ist die Zuteilung von der Zeit abhängig. So kann eine Person beim befahren der Infrastruktur ein Nutzer und wenn er Zuhause, in seiner an die Infrastruktur angrenzenden Liegenschaft, ist, Teil der direkt betroffenen Öffentlichkeit sein. Die zweite Stufe beschreibt die Interessensgruppen, die von der Maximierung des netto Nutzen der Interessensgruppen der ersten Stufe, beeinflusst werden. Diese werden, sofern sie nicht Teil einer Interessensgruppe der ersten Stufe sind, nicht weiter berücksichtigt oder aber falls dies explizit gefordert wird. (Adey, Burkhalter und Martani 2019)

2.3 Zielfunktion

Um die optimale Lösung zu bestimmen, können im Problemlösungsprozess mathematische Modelle verwendet werden. Viele der verwendeten Modelle, zur Optimierung von Problemen, haben einen einheitlichen Aufbau aus einer Zielfunktion, die es zu maximieren oder minimieren gilt, sowie aus Nebenbedingungen, die die Grenzen der Varianten definieren. Die Zielfunktion sowie die Nebenbedingungen können linear oder nichtlinear sein. Bei der Analyse von Varianten ist ein sogenanntes Lineare Programm (LP) mit einer linearen Zielfunktion und linearen Nebenbedingungen, aufgrund dessen, dass es mit dem Computer einfach zu berechnen ist, äusserst hilfreich. Die Maximierung oder Minimierung der Zielfunktion, bei welcher die Beziehung zwischen linker und rechter Seite der Nebenbedingung beliebige Formen annehmen kann, durch ein allgemeines LP-Problem ermöglicht. Bei der allgemeinen Formulierung eines LP werden alle linearen Ausdrücke auf die linke und alle konstanten Ausdrücke auf die rechte Seite des Vergleichszeichens geschrieben. Adey 2019

Nach Adey 2019 erfolgt die Darstellung einer Zielfunktion gemäss Formel 2.1.

$$\text{Maximieren} : Z = c_1 \cdot x_1 + c_2 \cdot x_2 + c_3 \cdot x_3 + \dots + c_n \cdot x_n \quad (2.1)$$

mit:

- c_j = Gewinn für jede Einheit der j-ten Aktivität
- x_j = Ausmass der j-ten Aktivität oder Entscheidung
- $j\{1 \dots n\}$ = Index der Aktivitäten oder Entscheidungen

Nebenbedingungen

Gemäss (Adey et. all., 2019) sind die Nebenbedingungen der Versuch die Rahmenbedingungen mathematisch auszudrücken. Sie repräsentieren die Anzahl an Einheiten der Ressource i , die in allen Aktivitäten n konsumiert werden können. Die Nebenbedingungen werden wie folgt dargestellt:

$$\begin{aligned}
 a_{1,1} \cdot x_1 + a_{1,2} \cdot x_2 + a_{1,3} \cdot x_3 + \cdots + a_{1,n} \cdot x_n &\leq b_1 \\
 a_{2,1} \cdot x_1 + a_{2,2} \cdot x_2 + a_{2,3} \cdot x_3 + \cdots + a_{2,n} \cdot x_n &\leq b_2 \\
 &\vdots \\
 a_{m,1} \cdot x_1 + a_{m,2} \cdot x_2 + a_{m,3} \cdot x_3 + \cdots + a_{m,n} \cdot x_n &\leq b_m
 \end{aligned} \tag{2.2}$$

mit:

- $a_{i,j}$ = Koeffizient der j -ten Aktivität in der i -ten Nebenbedingung
- x_j = Ausmass der j -ten Aktivität oder Entscheidung
- b_i = Verfügbare Menge der Ressource i
- $i\{1 \dots m\}$ = Index der Ressourcen
- $j\{1 \dots n\}$ = Index der Aktivitäten oder Entscheidungen

Nichtnegativitätsbedingungen

Gemäss (Adey 2019) verhindern Nichtnegativitätsbedingungen, dass negative Werte im Ergebnis vorkommen. Dies bedeutet, dass Aktivitäten nur zu einem positiven Mass oder gar nicht durchgeführt werden dürfen. Für jede Art von Ressource, die in einer Gruppe von Aktivitäten konsumiert wird, d.h. für $i = 1, 2, \dots, m$ müssen diese Nebenbedingungen definiert werden.

$$x_1 \geq 0, x_2 \geq 0, x_3 \geq 0, \dots, x_n \geq 0 \tag{2.3}$$

2.4 Entscheidungsbaum

In einem Entscheidungsbaum werden alle Möglichkeiten, Entscheidungen und berücksichtigten Varianten des Entscheidungsprozess dargestellt. Dies soll dem Betrachter ermöglichen, nachzuvollziehen wieso eine Entscheidung getroffen wurde. Damit man die Ergebnisse des Entscheidungsbaums vergleichen kann, müssen einerseits die Unsicherheiten der betrachteten Szenarien bekannt sein und andererseits die Bewertung der Varianten anhand einer einheitlichen Skalierung erfolgen.

Ein Entscheidungsbaum besteht aus fünf Grundelementen, die nachfolgend anhand (Adey 2019) kurz erläutert werden.

Kosten bzw. Nutzen stellen dar, was für die Entscheidung relevant ist. Um den Erwartungswert eines Szenario berechnen zu können, müssen alle die gleiche Masseinheit haben.

Wahrscheinlichkeiten liegen immer zwischen 0 und 1, und stellen dar wie wahrscheinlich das Eintreten einer Möglichkeit ist. Der mit der Wahrscheinlichkeit gewichtete Wert, ist somit stets kleiner oder gleich dem ursprünglichen Wert.

Entscheidungsknoten sind durch quadratische Knoten gekennzeichnet, an welchen der Entscheidungsträger zwischen verschiedenen Varianten auswählen muss. An diesen Verzweigungen beeinflusst der Entscheidungsträger den Entscheidungsprozess mit der Wahl einer Variante. Der Wert des Entscheidungsknoten wird auf der Summe aller eingehenden Zweige gebildet.

Möglichkeitsknoten stellen Verzweigungen dar, bei denen unsicher ist, welches Szenario eintreten wird. Sie werden mit einem Kreis dargestellt, wobei die vom Kreis ausgehenden Linien die möglichen Entscheidungen darstellen. Diese Entscheidung kann der Entscheidungsträger nicht beeinflussen. Der Erwartungswert eines Möglichkeitsknoten ist die Summe der wahrscheinlichkeitsgewichteten Werte der verschiedenen Möglichkeiten eines Knoten. Folgen zwei Entscheidungsknoten aufeinander, ergibt sich am Ende des Pfades eine Kombination der Szenarien. Die Eintrittswahrscheinlichkeit eines kombinierten Szenarios berechnet sich aus der Multiplikation der Wahrscheinlichkeiten entlang des Pfades.

Blätter symbolisieren durch ein gekipptes gleichseitiges Dreieck das Ende eines Pfades. An dieser Stelle werden die Gesamtkosten bzw. -nutzen eines möglichen Szenarios eingetragen.

2 Grundlagen und Theorie

Die nachfolgenden Abbildung zeigt ein fiktives Beispiel eines Entscheidungsbaum im Rahmen einer Variantewahl.

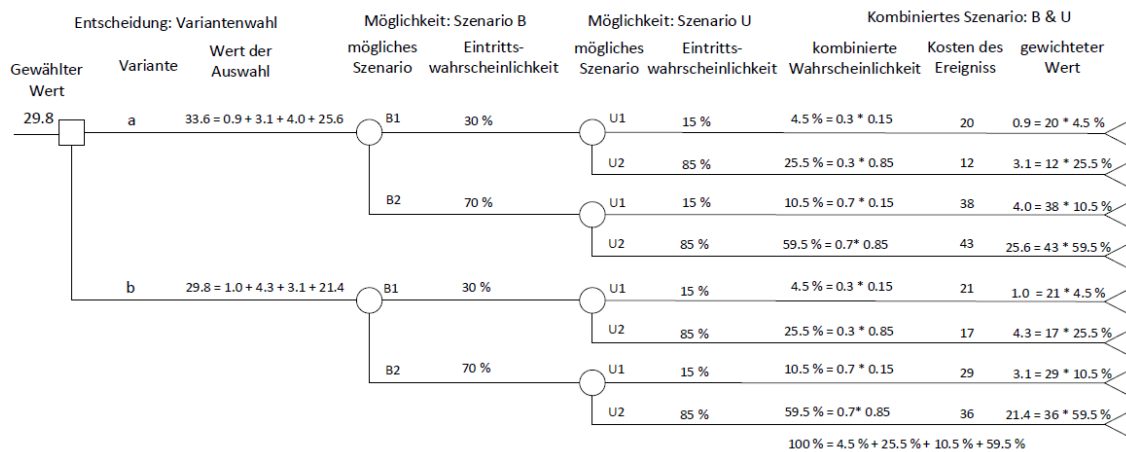


Abbildung 2.2: Beispiel eines Entscheidungsbaum

Gesucht wird die Variante, welche die geringsten zuerwartenden Kosten und somit das kleinste Risiko generiert. Die Berechnung der Kosten erfolgt in diesem Beispiel von rechts nach Links, wobei der zeitliche Verlauf der Entscheidungssituation von links nach rechts dargestellt wird.

2.5 Sensitivitätsanalyse

Ein wichtiger Bestandteil der Kosten-Nutzen Analyse ist zu untersuchen, wie stark ein Ergebnis von den getroffenen Annahmen abhängt. Dies erfolgt anhand der sogenannten Sensitivitätsanalyse, die aufzeigt, ob das Ergebnis von den getroffenen Annahmen abhängt und wie robust das Ergebnis auf eine Variation der Parameter reagiert.

Die Sensitivitätsanalyse kann sowohl mit den Nebenbedingungen als auch mit der Zielfunktion durchgeführt werden. In beiden Fällen wird untersucht was passiert bei einer Veränderung der ursprünglichen Annahmen und in welchem Rahmen können die Parameter verändert werden, ohne dass sich das ursprüngliche Ergebnis verändert. Diese Analyse ermöglicht es die Belastbarkeit der Ergebnisse, in einer allfälligen Diskussion der Variante, zu stärken. (Adey 2019)

2.6 Real option methodology

Die *real option methodology* ist ein Vorgehen, um die optimale Variante einer Intervention, unter Berücksichtigung von unsicheren zukünftigen Gegebenheiten, zu bestimmen. Die *real option methodology* ermöglicht es, Varianten einer Infrastruktur Intervention zu erarbeiten, die auf zukünftige veränderliche Rahmenbedingungen vorbereitet sind.

So kann das einbeziehen von flexiblen Designs, im Prozess der Erschaffung einer Infrastrukturintervention, zusätzliche Vorteile generieren sowie zukünftige Risiken beseitigen.

Weiter sollten Infrastrukturen über einen längeren Zeitraum hinweg, ihre Serviceleistung auf einem angemessenen Niveau erbringen können. Dies setzt voraus, dass sich die Infrastruktur an veränderliche Bedingungen anpassen und die Bedürfnisse der Interessensgruppen über einen längeren Zeitraum erfüllen, kann. Mit dieser Methodik kann, unter Berücksichtigung von unsicheren Variablen wie zum Beispiel der Veränderung der Anzahl Nutzer oder der Baukosten, ermittelt werden, welches Design den netto Nutzen des Investors am meisten vergrößert. Das Design einer Infrastruktur anstatt star, flexible zu gestalten ist meistens sehr teuer. Dies lohnt sich nur dann, wenn die Anpassungskosten der Infrastruktur kleiner als die Mehrkosten des flexiblen Designs sind. (Neufville und Scholtes 2011) (Esders, Morte und Adey 2015) Martani, Cattarinussi und Adey 2018

3 Vorgehen und Methodik

Um eine Verbesserung der Verkehrssituation in Uster zu erreichen, müssen die unsicheren zukünftigen Gegebenheiten in der Generierung der Lösungsvarianten berücksichtigt werden. Eine optimale Variante zu erarbeiten, erfordert ein systematisches Vorgehen. Für das Bearbeiten der Problemstellung habe ich die Schritte und Überlegungen des Problemlösungsprozesses und der Real Option Methodology verwendet. Die nachfolgende Beschreibung fasst mein Vorgehen kurz zusammen.

Zur Bestimmung der Systemgrenzen wird eine Situationsanalyse durchgeführt. Mit dieser wird, zum einen die Infrastruktur und zum anderen der Zeithorizont über den die Intervention untersucht wird, ermittelt. Zusätzlich werden die Faktoren, welche die zukünftigen Gegebenheiten in Uster am stärksten beeinflussen, definiert. Dies geschieht unter Berücksichtigung der momentanen Situation und der Annahmen, wie Uster in Zukunft funktionieren wird. Die Analyse schafft die Basis für die Formulierung der Ziele, welche in einem nächsten Schritt festgelegt werden.

Die Ziele legen fest, was mit der Intervention erreicht werden soll. Um zu bestimmen, was effektiv erreicht werden soll, müssen die betroffenen Parteien und ihre Bedürfnisse definiert werden. Für diese sogenannten Interessensgruppen werden alle relevanten Kosten und Nutzen ermittelt und anhand dieser relevanten Kosten, wird in einem nächsten Schritt die zu optimierende Zielfunktion definiert. Darauf folgt die ausführliche Beschreibung der Kosten und die Bestimmung der Einflussfaktoren auf die zukünftigen unsicheren Gegebenheiten.

Als nächstes folgt die Phase, in der mögliche Lösungen generiert werden. In dieser Phase werden die Infrastrukturinterventionen erarbeitet, welche die Problemstellung beheben könnten. Dies erfolgt unter Berücksichtigung der jetzigen Situation und der Erschaffung von möglichst flexibel designten Lösungsvarianten.

Der nächste Schritt beinhaltet die Analyse der im vorangehenden Schritt erarbeiteten Lösungsvarianten. Zuerst gilt es, die als unsicher definierten Parameter, anhand von Szenarien zu modellieren. Um die Lösungsvorschläge unter dem Einfluss der verschiedenen Szenarien untersuchen zu können, müssen die Wahrscheinlichkeiten definiert werden, nach welchen ein Szenario eintreten wird. Die Eintrittswahrscheinlichkeit einer Kombination zweier Szenarien, ergibt sich auf der Multiplikation der Wahrscheinlichkeiten der einzelnen Szenarien.

Der letzte Schritt zur Bestimmung der optimalen Variante, beinhaltet die Bewertung der Lösungen. In dieser Phase wird, mithilfe des Entscheidungsbaums, das jeweilige Risiko der Varianten ermittelt. Um aufzuzeigen, wie die Veränderung

der Parameter der Kostenstruktur das Ergebniss beeinflusst, sowie um zu untersuchen, infwiefern sich das Ergebniss ändert, wenn die geschätzte Eintrittswahrscheinlichkeit der Szenarien variiert, wird eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Eine Sensitivitätsanalyse erfolgt jeweils nur für einen Parameter, um deutlicher aufzeigen zu können, welchen Effekt diese Veränderung auf den Entscheidungsprozess hat.

Mit dem hier vorgestellten Vorgehen, wird im Rahmen dieser Projektarbeit eine optimale Lösungsvariante, zur Verbesserung der Verkehrssituation in Uster erschaffen. Nach dem betrachten, der zur verfügung gestellten Literatur, komme ich zum Schluss, dass eine solche Untersuchung, so noch nicht durchgeführt wurde. In den betrachteten Arbeiten wird jeweils nur ein Objekt hinsichtlich der Flexibilität des Designs auf unsichere zukünftige Gegebenheiten untersucht. Das bearbeiten eines gesamten Infrastruktursystems, mit mehreren, sich gegenseitig beeinflussenden Komponenten, wie zum Beispiel verschiedenen Fahrbahnen, Fussgängerzonen sowie Grün- und Parkanlage, ist meines erachtens, so noch nicht durchgeführt worden.

4 Fallstudie

Uster ist die dritt grösste Stadt im Kanton Zürich und liegt östlich des Greifensees. Die Stadt ist geprägt von der Entwicklung von einer dörflich geprägten Industriestadt zu einer Wohn- und Arbeitsstadt im ländlichen Umfeld. Aufgrund des angrenzenden Waldstück und der Nähe zum Greifensee, hat Uster einen hohen Freizeit und Erholungswert. Die Entwicklung der Stadt aus mehreren Dörfern heraus, hat zur Folge, dass viele Einkaufsmöglichkeiten sowie Arbeitsplatzstandorte dezentral verteilt sind. Die historisch bedingte Verteilung der Büro- und Gewerbeflächen und die unterschiedlichen Standortqualitäten haben zu unterschiedlich ausgeprägten Stadtteilen geführt. Die Siedlungsgebiet in Uster wurden seit 1984 nicht mehr gross erweitert, weshalb ein weiteres Wachstum nur im Bestand möglich sein wird. Dies, und das unsichere zukünftige Bevölkerungswachstum, stellt für Uster eine grosse Herausforderung dar. (Geschäftsfeld Stadtraum und Natur 2019))

Das Berücksichtigen der Bedürfnisse der Bevölkerung von Uster, ist, um eine Optimierung der bestehenden Verkehrssystem zu erreichen, unabdingbar. Die Aufwertung des Stadtzentrum, die Steigerung der Aufenthaltsqualität und die Verbesserung der Erreichbarkeit des Zentrum, haben für die Bevölkerung von Uster oberste Priorität. Dies soll, durch die Verkehrsberuhigung der zentrumsnahen Verkehrsnetze und durch die punktuelle Aufwertung der Strassenräume erfolgen.

Dass die Poststelle mit dem Auto, trotz Zentrumsaufwertung, erreichbar bleibt, ist der Ustermer Bevölkerung ein weiteres wichtiges Anliegen. Zusätzlich wünscht die Bevölkerung, dass die nördlich des Bahnhofs gelegenen Quartiere besser an das Zentrum angebunden und die Einkaufsmöglichkeiten in diesen Quartieren ausgebaut, werden. Dies setzt voraus, dass die Gleisquerung verbessert wird. Ausserdem hat die Bevölkerungsbefragung in Uster im Jahr 2015 ergeben, dass sich die Stadtbevölkerung einen Ausbau der Veloinfrastruktur wünscht, mit besonderem Augenmerk auf der Verbesserung der Situation an den Bahnübergängen.

Um diese Bedürfnisse ausreichend befriedigen zu können, wurde im STEK, die Ziele und strategischen Stossrichtungen der räumlichen Stadtentwicklung von Uster bis 2035 festgelegt. Der Stadtrat von Uster legt fest, dass auf Grundlage des STEK, die kommunalen Richt- und Nutzungspläne bis 2025 revidiert werden. Folglich nehme ich an, dass, um eine Prognose für die Zukunft von Uster machen zu können, die Leitziele des STEK berücksichtigt werden müssen. Die Leitziele lauten gemäss (Geschäftsfeld Stadtraum und Natur 2019) wie folgt:

Stadtidentität *Bewahrung und Weiterentwicklung der Vielseitigkeit* Die Stadt soll ihre polyzentrale Struktur behalten und die Vielseitigkeit der Innenstadt soll bewahrt werden. Uster soll in seiner Rolle als Regionalzentrum gestärkt werden, in dem das Wachstum auf das Zentrum und die gut erschlossenen Gebiete von Nänikon beschränkt wird.

Stadtentwicklung *Wohnen und Arbeiten finden statt* Das Arbeitsplatzangebot soll sich im Gleichschritt mit dem Wohnungsmarkt entwickeln, um das Verhältniss von zwei Einwohnern auf einen Arbeitsplatz beizubehalten. Im Rahmen der Stadtentwicklung 2035, möchte die Stadt Uster, die zentrumsnahen Gebiete und die Bahnhofsumgebung in ein, mit Wohnungen durchmisches Arbeitsplatgebiet umgestalten.

Landschaft und Erholung *Grün- und Freiräume vor der Haustüre* Die Uster umgebenden Landschaften sollen erhalten und wo nötig aufgewertet werden und durch attraktive gestaltete Freiräume im Siedlungsgebiet, sowie durch gezieltes aufwerten der Erholungsräume, den Nutzungsdruck auf die Naturräume gemildert werden.

Mobilität *Uster steigt um!* Um die Kapazitätsengpässe im bestehenden Verkehrsnetz zu mildern, erwägt Uster einen Umstieg vom motorisierten Individualverkehr kurz. MIV auf den öffentlichen Verkehr, kurz. ÖV, und auf den Langsamverkehr, sprich Velo- und Fussgängerverkehr. Die Stadt Uster setzt sich zum Ziel, eine Reduktion des MIV Anteil am Modalsplit des innerstädtischen Verkehr zuerreichen und den Langsam-sprich Veloverkehr nachhaltig zu fördern. Dies geschieht durch die Verbesserung der Routen und Fahrbedingungen des Veloverkehrs. Insbesondere im Zentrum, wird die Verkehrsführung angepasst, um einerseits die Erreichbarkeit mit dem Velo zu verbessern und andererseits die Aufenthaltsqualität durch die lokale Verkehrsberuhigungen zu erhöhen.

Im Rahmen des Leitbild *Stadtraum Uster 2035* werden im STEK sogenannte Schlüsselprojekte definiert. Als Schlüsselprojekte bezeichnet, werden Interventionen, die durch ihre Ausführung, in ihrer Umgebung eine weitere Entwicklung auslösen sollen. Die wichtigsten Schlüsselprojekte sind; das Bahnhofsgebiet, das verkehrsberuhigte Zentrum, das Zeughausareal, die Erholungsachse Aabach, die urbane Strassenraumgestaltung im Zentrumsgebiet und die Fuss- und Velounterführung Brunnen-/Bahnhofstrasse, sowie die beiden kantonalen Projekte zur Stadterschliessung; Usterwest und Umfahrung Moosackerstrasse. Das Ausmass, der aufgrund der Ausführung dieser Projekte entstehenden Auswirkungen auf die Verkehrsleistung in Uster, kann nicht mit absoluter Sicherheit vorher gesagt werden. (Geschäftsfeld Stadtraum und Natur 2019)

Die Stadtentwicklung sieht vor, dass das Zentrum von Uster attraktiv umgestalt wird. Diese Zentrumsentwicklung soll, durch bauliche Verdichtung die Nachfrage vor Ort steigern. Durch die Aufwertung des Strassenraums und durch Massnahmen zur Verkehrsberuhigung, soll das Zentrum für Velofahrer besser erreichbar werden, wobei die Erreichbarkeit mit dem Auto gewahrt bleiben soll. Die Umgestaltung der Strassenräume der Innenstadt, zu urbanen Begegnungszonen, erfordert eine Anpassung der Verkehrsregime.

Aufgrund dessen, dass die Versorgungslage im Stadtzentrum die Standortqualität von Uster als Wohn- und Arbeitsstadt beeinflusst und dass die Bevölkerungsbefragung ergeben hat, dass die steigerung der Attraktivität des Zentrums für die Bevölkerung von hohem Interesse ist, hat die Zentrumsentwicklung, höchste Priorität.

Gemäss der STEK haben die bahnhofsnahen Grundstücke die grössten Wachstumspotentiale. Das heisst, dass die Umnutzung dieser Grundstücke infolge der Aufwertung des Stadt-zentrums, mit grösster Wahrscheinlichkeit zu einer Erhöhung der Verkehrsbelastung am

Bahnhof und den zentrumsnahen Verkehrsnetzen, führen wird. Insbesondere auf dem Velonetz, ist infolge dessen, mit einer in der Zukunft erhöhten Belastung zurechnen. (Geschäftsfeld Stadtraum und Natur 2019)

Verkehr ist in Uster ein politisch äusserst umstrittenes Thema. Das Zentrum ist stark geprägt durch den MIV und ein nahezu flächendeckendes Tempo 30 Regime. Der Quell- und Zielverkehr in Zentrum und der hauptsächlich in Nord-Süd Richtung erfolgende Durchgangsverkehr, haben ein hohes Verkehrsaufkommen im Zentrum zur Folge. Die Aufenthaltsqualität auf den wichtigsten Strassen im Zentrum, wie zum Beispiel der Bankstrasse und der Bahnhofstrasse, ist durch die hohe Verkehrsbelastung, reduziert. Insbesondere die Bankstrasse ist zu Spitzenbelastungszeiten ein Nadelöhr im ÖV-Netz, da das grosse Verkehrsaufkommen, das An- und Abfahren der Busse erschwert.

Ausserdem, um möglichst kurze Wartezeiten zu ermöglichen, erreichen alle Buslinien den Bahnhof zur selben Zeit. Dies hat eine hohe Belastung der bahnhofsnahen Verkehrsinfrastruktur zur Folge.

Durch die Kombination aus S-Bahn und bis zu sechs Stadtbuslinien, ist Uster durch den öffentlichen Verkehr in grossen Teilen erschlossen. Jedoch hat der, durch den grosse Anteil an MIV am innerstädtischen Verkehr entstehenden Stau, zur Folge, dass die Fahrplanstabilität des ÖV beeinträchtigt wird. (Geschäftsfeld Stadtraum und Natur 2019)

Uster erwartet aufgrund des Bevölkerungs- und Arbeitsplatzwachstum eine Zunahme des Verkehrsaufkommen. Um eine ausreichende Mobilität gewährleisten zu können und die Umweltbelastung zu reduzieren, hat Uster, im Rahmen des Gesamtverkehrskonzept des Kanton Zürichs, zwei Ziele formuliert. Zum einen soll die Erreichbarkeit der urbanen Räume verbessert und zum anderen, durch gezielte Eingriffe, eine Erhöhung des Langsamverkehrsanteil am Gesamtverkehrsaufkommen erwirkt werden. Das Langsamverkehrsnetz, sprich Velo- und Fusswegenetz, ist gemäss dem STEK, vorallem auf den kurzen und zentrumsnahen Haupttrouten zu stärken. Gemäss kantonalem Richtplan soll der Anteil des Langsamverkehrs am Gesamtverkehrsaufkommen, von 20% (2011) auf 22% (2030) erhöht werden. Dies bedingt, dass der Modalsplit des Innerstädtischenverkehr zugunsten des Langsamverkehrs verändert wird. Jedoch soll die Kapazitäten des MIV weder erhöht, noch merklich reduziert werden.

Der MIV-Anteil am innerstädtischen Ziel-, Quell- und Binnenverkehr beträgt gemäss STEK 57%. Demnach sind die Verkehrsprobleme von Uster mehrheitlich selbst verursacht. Zusätzlich hat das sternförmig angelegte Strassennetz zur Folge, dass der Nord-Süd Durchgangsverkehr, durch das Stadtzentrum geführt wird. Die wichtigsten Knotenpunkte, wie zum Beispiel der Nüsslikreisel, der Nashornkreisel sowie die Seefeldstrasse, geraten in den Spitzenbelastungszeiten an ihre Kapazitätsgrenzen.

Die Abbildung 4.1 zeigt die geplanten kantonalen Strassenprojekte Usterwest und Moosackerstrasse. Durch diese Strassenprojekte, sollen einerseits die Stadterschliessung verbessert und andererseits das Zentrum vom Durchgangsverkehr entlastet werden. Insbesondere die Verkehrsbelastung des Nüsslikreis, soll durch den Bau der Moosackerstrasse reduziert werden. Gemäss dem STEK ist die Realisierung der Uster Westumfahrung in näherer Zukunft nicht absehbar. Mit dem Bau der Moosackerstrasse hingegen, kann in näherer Zukunft gerechnet werden, was zu einer Reduktion des Durchgangsverkehr im Zentrum und einer

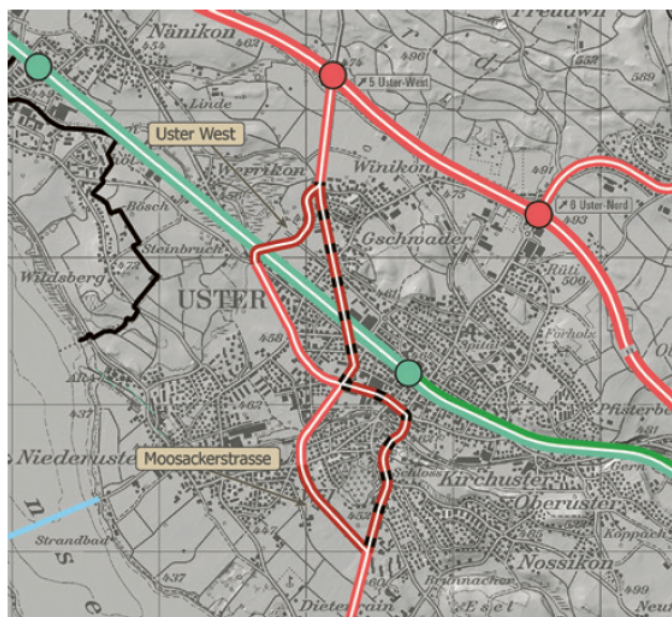


Abbildung 4.1: Moosackerstrasse und Usterwest gemäss (Geschäftsfeld Stadtraum und Natur 2019)

Entlastung des Nüsslikreisel führen wird. Laut dem STEK wird die Situation an den bestehenden Bahnübergängen, durch den Bau der Moosackerstrasse nicht verbessert. Um die Situation an den Bahnübergängen nachhaltig zu verbessern, muss ein anderer Lösungsansatz gefunden werden.

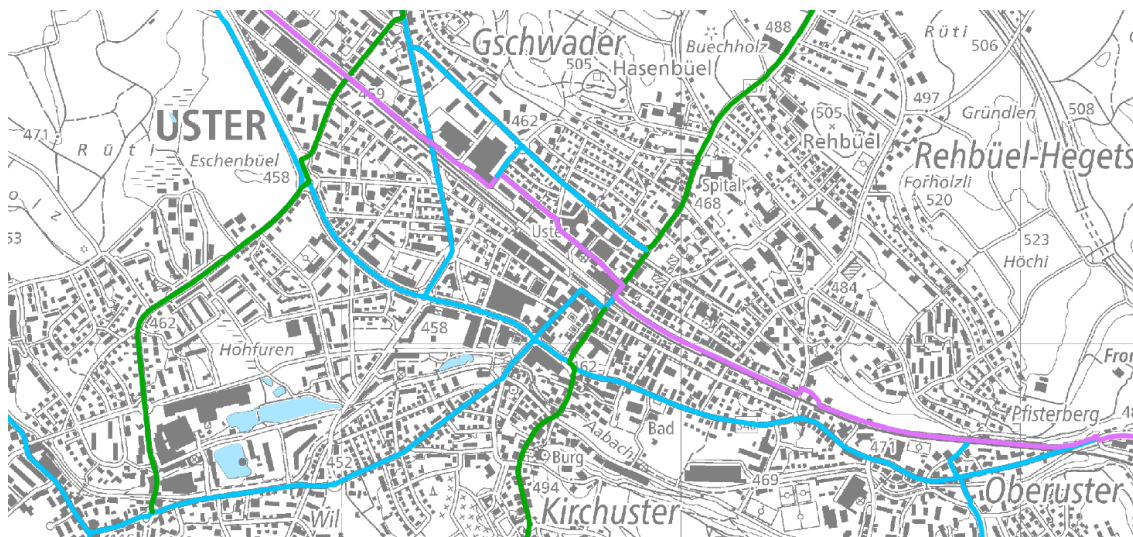


Abbildung 4.2: Velonetz Alltag (Kanton Zürich 2019a)

Die Abbildung 4.2 zeigt das Velonetz der Innenstadt von Uster. In grün sind die Hauptverbindungen, in blau die Nebenverbindungen und in violett die Veloschnellroute dargestellt. Wie in der Abbildung ersichtlich, ist der Bahnübergang Brunnenstrasse der zentrale Kno-

tenpunkt des Velonetz. Die Gleisquerung ist für den Langsamverkehr, aufgrund des dichten S-Bahn Fahrplans, nur mit langen Wartezeiten möglich.

Gemäss der Leitziele, die sich Uster im Rahmen der Stadtentwicklung 2035 gegeben hat, soll Uster zur Velostadt ausgebaut werden. Die von der SP eingereichte Velointiative wieder spiegelt das Bedürfnis der Bevölkerung nach einer Förderung des Langsamverkehrs. Insbesondere die, im kantonalen Städtevergleich, als unterdurchschnittlich erachtete Dichte des Velonetz, stellt für die Bevölkerung ein Mangel dar. Ausserdem ist die Verkehrssicherheit, aufgrund der stark am MIV ausgerichteten Strassenräume, auf dem bestehenden Velonetz mangelhaft.

So fordert die Bevölkerung von Uster eine zukunftsorientierte Gestaltung des Velonetz, insbesondere unter Berücksichtigung der neuen Velotypen, wie Lastenräder und schnellen E-Bikes, sowie der Verbesserung der Möglichkeit zu Querung der Gleisanlagen.

Nach der Analyse des STEK, bin ich zum Schluss gekommen, dass die Zerschneidung der Stadt durch die Gleisanlage, eines der grössten Probleme von Uster darstellt. Die Verbesserung der Gleisquerung, sowie die Erhöhung der Sicherheit auf dem bestehenden Velonetz und die damit einhergehende Erhöhung der Erreichbarkeit des Zentrums durch den Langsamverkehr, erachte ich als die zentralen Punkte, um eine Verbesserung der Verkehrssituation in Uster zu erreichen. Aufgrund dessen und unter Berücksichtigung der Leitziele des STEK den Langsamverkehr zu fördern, habe ich mich dazu entschieden, den Bahnübergang Brunnenstrasse, für den Veloverkehr zu optimieren, um einen nachhaltige Verbesserung der Verkehrssituation zu erreichen.



Abbildung 4.3: Bahnübergang Brunnenstrasse und Velonetz Alltag (Kanton Zürich 2019a)

Die Abbildung 4.3 zeigt den Bahnübergang Brunnenstrasse. Diese Infrastruktur verbindet die südlich des Bahnhofs gelegenen Stadtteile mit dem Spital und der Sportanlage Buchholz, sowie die nördlich des Bahnhofs gelegenen Quartiere mit dem Stadtzentrum und dem Greifensee.

Die von mir erarbeitete Intervention, soll die Situation am Bahnübergang nachhaltig verbessern. Deshalb untersuche ich, im Rahmen dieser Arbeit, den Effekt dieser Varianten auf die Verkehrssituation, über einen Zeitraum von vierzig Jahren. Um das beste Investment für die Stadt Uster, ermitteln zu können, definiere ich im nachfolgenden Abschnitt, die Ziele die mit der Intervention erreicht werden sollen.

4.1 Formulierung der Ziele und Rahmenbedingungen

In Anbetracht der dezentralen Struktur von Uster und der geplanten Umgestaltung der Innenstadt zur Begegnungszone ist, ist eine Verbesserung der Erreichbarkeit des Zentrums unabdingbar. Eine Verbesserung der Erreichbarkeit setzt voraus, dass die Reisezeit verkürzt und die Verkehrssicherheit erhöht wird. Das bedeutet, dass die Möglichkeit zur Gleisquerung ausgebaut und mit einer besseren Signalisation ausgestattet wird. Weiter soll die Zerschneidung der Stadt, durch die Gleisanlage entschärft und so einen wichtigen Beitrag zur Stadtentwicklung geleistet werden. Die von mir geplante Infrastruktur Intervention, soll die Verkehrssituation am Bahnhof nachhaltig verbessern, sowie die Attraktivität und die Standortqualitäten von Uster stärken. Das Ziel der Intervention soll demnach sein, der gesteigerten Nachfrage nach Mobilität Rechnung zu tragen, sowie den Langsamverkehrsanteil am Modalsplit des Innenstadtverkehrs zu erhöhen, unter Berücksichtigung der unsicheren zukünftigen Gegebenheiten.

Um ermitteln zu können, welche Variante einer Intervention die beste ist, muss in einem ersten Schritt definiert werden, was als *am besten* erachtet wird. Dafür müssen die Bedürfnisse der beteiligten Personen berücksichtigt werden.

Um zu bestimmen, was für diese Personen *am besten* ist, müssen ihre, durch die Infrastruktur entstehenden Kosten und Nutzen berücksichtigt werden.

Das Ziel meiner Optimierung ist, durch die Minimierung der Kosten, den Gesamtnutzen aller Interessensgruppen zu steigern. Aufgrund dessen, dass in der nachfolgenden Berechnung, nur die Kosten der beteiligten Personen berücksichtigt wird, ist die Minimierung der Kosten, mit der Maximierung des Nutzens gleichzusetzen.

So sollen einerseits, durch die Reduktion der Reisezeit die Kosten der Nutzer reduziert werden und andererseits, durch die Erhöhung der Verkehrssicherheit, die Kosten der Allgemeinheit reduziert werden.

4.1.1 Interessensgruppen

Der Nutzen der von einer Intervention ausgeht, ist definiert, als die positive oder negative Auswirkung, die das Ausführen einer solchen Intervention auf die beteiligten Personen hat. Demzufolge entspricht der Nutzen einer Intervention, dem Effekt der Veränderung der aktuellen Situation. Um den Mehrwert einer Intervention ermitteln zu können, muss in einem ersten Schritt die beteiligten Personen bestimmt werden. Die sogenannte Interessensgruppen, werden gemäss Abschnitt 2.2 bestimmt und im nachfolgenden Abschnitt kurz erläutert, sowie die wichtigsten Kosten der beteiligten Parteien vorgestellt.

Besitzer Die Interessensgruppe der Eigentümer der Infrastruktur setzt sich aus verschiedene Parteien zusammen. Die wichtigsten involvierten Parteien sind einerseits die Stadt Uster und der Kanton Zürich, für die Strasseninfrastruktur und andererseits die SBB als Inhaberin der Bahninfrastruktur. Diese Parteien haben einen grossen Einfluss darauf, welche Variante gebaut wird. Sie sind somit die wichtigsten Akteure im politischen Diskurs, über die Notwendigkeit einer Veränderung der Infrastruktur.

Der Besitzer der Infrastruktur bezahlt einerseits den Bau der Infrastrukturintervention und

ist andererseits dafür verantwortlich, dass die Seviceleistung welche die Infrastruktur erbringt, über den betrachteten Zeithorizont auf einem angemessenen Niveau, gewährleistet ist. Das bedeutet, dass er für die Kosten der Wartung und Instandhaltung der Infrastruktur aufkommen muss. Die Kosten die dem Besitzer über den betrachteten Zeitraum entstehen, setzen sich demnach aus den Arbeits- und Materialstunden für die jährliche Wartung und den Kosten den der Bau einer Variante verursacht, zusammen.

Nutzer Die Nutzer der Infrastruktur sind die Velo- und Autofahrer welche den Bahnübergang passieren. Der Velofahrer repräsentiert im Rahmen dieser Untersuchung gemäss der STEK, sämtliche Verkehrsteilnehmer des Langsamverkehrs. Langsamverkehr bedeutet, dass der Antrieb, ausschliesslich durch die eigene Muskelkraft erfolgt. Davon ausgenommen sind E-Bikes mit einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von unter 35 *km/h*.

Das befahren einer Infrastruktur kann dem Nutzer Kosten verursachen. In anbetracht der momentanen Verkehssituation am Bahnübergang sin die massgebenden Kosten die dem Nutzer entstehen, zum einen die Kosten durch verlängerte Reisezeiten, die sogenannten Reisezeitkosten (*TT*) (engl. Travel time cost) und die Kosten die durch den Betrieb des Fahrzeugs beim befahren der Infrastruktur entstehen. Der Nutzer hat das grösste Interesse an einer Veränderung der aktuellen Verkehrssituation und ist am stärksten von einer Veränderung betroffen ist. Demnach ist es unerlässlich die Kosten die dem Nutzer entstehen, in der Berechnung der Kosten einer Intervention, zu berücksichtigen.

Öffentliche Hand Die Öffentliche Hand setzt sich aus den direkt und indirekt von der Infrastruktur betroffenen Personen zusammen. Die direkt betroffenen, sind zum einen die Anwohner am Bahnübergang und zum anderen die Inhaber von Geschäften und Restaurants, in unmittelbarer Umgebung der Infrastruktur. Sie werden durch die Schadstoffemissionen und die Lärmemission, die von der Infrastruktur verursacht werden, beeinträchtigt. Die dadurch entstehenden Kosten, werden von der Allgemeinheit getragen.

Die indirekt betroffene Öffentlichkeit repräsentiert im Rahmen dieser Untersuchung, die gesamte Bevölkerung der Stadt Uster. Sie tragen einerseits die Kosten durch die Belastung der Umwelt mit und zusätzlich die entstehenden Gesundheitskosten durch Unfälle auf der Infrastruktur.

Diese Unfallkosten gehen zulasten der Allgemeinheit, in Form der Belastung des Gesundheitssystems. Die Allgemeinheit nutzt in diesem Sinne die Infrastruktur nicht und ist auch nicht in ihrer Nähe zuhause oder bei der Arbeit, sondern wird durch die Nutzung der Infrastruktur indirekt beeinträchtigt.

Zur Vereinfachung werden die direkt und indirekt betroffenen Personen unter dem Stichpunkt *Öffentliche Hand* zusammengefasst.

4.1.2 Zielfunktion

Bei einer Optimierung eines Systems sind mathematische Modelle sehr hilfreich. Ein besonders nützliches Modell in der Analyse von Varianten ist ein Lineares Programm. Dies setzt voraus das alle relevanten Informationen aus der Situationsanalyse und der Zielformulierung in ein mathematisches Modell umgewandelt werden. Im Rahmen dieser Arbeit,

erfolgt dies durch die nachfolgend beschriebene Zielfunktion. Die Zielfunktion beinhaltet alle relevanten Kosten der Interessensgruppen der Infrastruktur. (Adey 2019)

Die Gleichung 4.1 stellt das zu optimierende Problem als mathematische Funktion dar. Die totalen Kosten TK einer Interventionsstrategie sind definiert als, die Kosten aller Stakeholder über den untersuchten Zeitraum $[0, T]$

Da in meinem Fall die Erlöse nicht in Betracht gezogen werden, ist die Minimierung der Gesamtkosten äquivalent zur Maximierung des netto Nutzens aller beteiligten Interessensgruppen. Zusätzlich setzt die Bedingungen 4.2 voraus, dass keine Negativen Werte berücksichtigt werden. Die Zeit 0 kennzeichnet den Startpunkt der Untersuchung wobei die Zeit T das Ende der Untersuchungsperiode ist.

$$Min. K = Min. [K_U + K_B + K_{TT} + K_E + K_A] \quad (4.1)$$

- Nichtnegativitätsbedingungen:

$$K_U \geq 0, K_B \geq 0, K_{TT} \geq 0, K_E \geq 0, K_A \geq 0 \quad (4.2)$$

FORM EL verbessern, + Nichtnegativitätsbedingunge
wobei:

- K_i = Totale Kosten über den betrachteten Zeitraum von T Jahren
- K_U^i = Totale Unterhalts- und Baukosten
- K_B^i = Totale Betriebskosten
- K_{TT}^i = Totale Reisezeitkosten
- K_E^i = Totale Umweltbelastungskosten
- K_A^i = Totale Unfallkosten

Mithilfe der Optimierung dieser Zielfunktion und der anschliessenden Analyse der Resultate, wird diejenige Intervention bestimmt, die den totalen Nutzen über den betrachteten Zeitraum am meisten steigert. Zur Übersicht fasst die Tabelle 4.1 die Interessensgruppen, sowie die jeweiligen Kosten zusammen. Die Kosten, der verschiedenen Interessensverbände im Zusammenhang mit der Infrastruktur, werden im nachfolgenden Kapitel erläutert.

Interessensgruppe	Kostentyp	Symbol	Einflussfaktoren
Besitzer	Unterhaltskosten (U)	K_U	Arbeits- und Materialkosten
Nutzer	Betriebskosten (B)	K_B	Kraftstoff- und Reparaturkosten
	Reisezeitkosten (TT)	K_{TT}	Kosten einer Arbeitsstunde
Öffentliche Hand	Umweltbelastungskosten (Environment) (E)	K_E	Fahrzeugtechnologie
	Unfallkosten (A)	K_A	Verkehrssicherheit

Tabelle 4.1: Tabelle der Interessensgruppen und Kostenstrukturen

4.2 Kostenstruktur

Um das Risiko, welches von einer Infrastruktur Intervention ausgeht, berechnen zu können, muss die verwendete Kostenstruktur definiert werden. Im allgemeinen erfolgt die Approximation der Kosten durch die Bestimmung der relevanten Faktoren wie zum Beispiel der Länge und der Breite der Infrastruktur, des täglichen Verkehrsaufkommens, der benötigten Reisezeiten sowie weiterer Faktoren. Die Ermittlung der Kosten erfolgt im Anschluss durch die Multiplikation dieser Faktoren mit den dazugehörigen Einheitskosten. (Adey u. a. 2012)

Unterhaltskosten

Die Berechnung der Unterhaltskosten K_U der Infrastruktur erfolgt gemäss der Formel 4.3. Sie setzen sich zusammen aus den einmaligen Investitionskosten für den Bau der Infrastruktur K_{Bau} und den jährlich anfallenden Wartungskosten $K_{Wartung,t}$.

$$K_U = K_{Bau} + \sum_{t=0}^T K_{Wartung,t} \quad (4.3)$$

wobei:

- K_U = Totale Unterhaltskosten für T Jahre
- K_{Bau} = Baukosten der Variante
- $K_{Wartung,t}$ = Wartungskosten pro Jahr

Die Berechnung der Wartungskosten erfolgt anhand Formel 4.4. Die Einheitskosten für den Bau und die Wartung werden nachfolgend erläutert.

$$K_{Wartung,t} = \sum_{k=1}^2 EK_{Wartung,k} \cdot s_k \cdot b_k \quad (4.4)$$

$$k = \begin{cases} 1 & \text{für Strasse} \\ 2 & \text{für Unterführung} \end{cases}$$

wobei:

$EK_{Wartung,k}$ = Einheitskosten pro m^2
 s_k = Länge der Infrastruktur in m
 b_k = Breite der Infrastruktur in m
 k = Art der Infrastruktur

Die Erstellung zweier neuer Radstreifen à je 1.5 m Breite kostet pro Laufmeter 850 CHF. Die Investitionskosten pro Quadratmeter für den Bau einer Velounterführung unter dem Lastfall Eisenbahn, betragen 3750 CHF. Der Bau der Zufahrtsrampen zu den Velounterführungen kostet pro Rampe 130'000 CHF. (Kontextplan AG 2010) Die Wartungskosten habe ich nach einem Gespräch mit Herr Dr. Martani wie folgt angesetzt. Für die Instandhaltung der Strasse, inklusive der Fahrradstreifen und der Fussgängerwege fallen jährlich 5 $\frac{CHF}{m^2}$ an. Die wartungsintensivere Infrastruktur der Unterführung wird jährlich mit 30 $\frac{CHF}{m^2}$ instand gehalten.

Diese Kosten sind hauptsächlich von der Auslastung der Infrastruktur und vom Gewicht der Fahrzeuge, die sie befahren, abhängig. Da diese Kosten im Vergleich zu den anderen Kostenpositionen deutlich geringen ausfallen, verzichte ich auf eine Variation dieser Parameter über den betrachteten Zeithorizont. Die nachfolgende Tabelle 4.2 fasst die für die Besitzer anfallenden Einheitskosten zusammen.

		Fahrbahn	Veloweg	Unterführung
Unterhaltskosten	$\frac{CHF}{m^2 \text{ Jahr}}$	5	5	30
Baukosten	$\frac{CHF}{m}$	-	850	18'900

Tabelle 4.2: Bau- und Unterhaltskosten

Betriebskosten

Die Betriebskosten K_B die für die Nutzer der Infrastruktur, für den betrachteten Zeitraum von T Jahren, anfallen, werden gemäss Formel 4.5 berechnet. So werden die Betriebskosten aus der Multiplikation der Anzahl Nutzer und der zurückgelegten Distanz mit den Einheitskosten pro Fahrzeugkilometer ermittelt. Diese sogenannten Fahrzeugbetriebskosten sind im Rahmen dieser Optimierung, als die jährlich pro Nutzer anfallenden Wartungskosten definiert und sind somit die Kosten, die für die Instandsetzung und den Betrieb eines Fahrzeugs, bei benützung der Infrastruktur, entstehen können. Diese setzen sich zusammen aus den Kosten der Arbeitsstunden für die Instandsetzung sowie der Kosten für die Ersatz- und Verschleisssteile.

Diese Kosten sind abhängig von der Qualität des Fahrbahnbelags, von der Ausführung der Infrastruktur und von der Kapazität der Infrastruktur. Weiter ist ein entscheidender Faktor in der Bestimmung der Fahrzeugbetriebskosten die Strassengeometrie. Diese beinhaltet die Anzahl und Form der Kurven, die Steigungen sowie die Breite der Strasse und die daraus resultierende Möglichkeit des sicheren Überholens. Die Anzahl an Kreuzungsstellen und die davon abhängige Anzahl an Brems- und Beschleunigungsmanöver haben einen direkten Einfluss auf den Verschleiss der Mechanik des Fahrzeugs. So werden im Falle des Fahrrads die Kette und die Bremsbeläge durch vermehrtes Bremsen und Anfahren verstärkt abgenutzt und im Falle des Autos erhöhen sich die Betriebskosten bei vermehrtem *Stop-and-Go* Verkehr.

$$K_B = \sum_{t=0}^T \left[\sum_{j=1}^2 EK_{B,j} \cdot s_k \cdot DTV_j \right] \cdot 365 \quad (4.5)$$

$$j = \begin{cases} 1 & \text{für } MIV \\ 2 & \text{für } Velo \end{cases}$$

wobei:

- K_B = Totale Fahrzeugbetriebskosten
- $EK_{B,j}$ = Einheitskosten pro km
- s_j = Länge der Infrastruktur; nach Fahrzeugtyp in km
- DTV_j = Tägliches Verkehrsaufkommen nach Fahrzeugtyp
- j = Art des Fahrzeugs

Die Einheitskosten des Fahrzeugbetrieb sind mehrheitlich abhängig von der Entwicklung der Fahrzeugtechnologie und der Verarbeitungsqualität. Die Einführung autonomer Fahrzeuge, würde diese Kostenposition in Zukunft obsolet machen. Jedoch ist die Zulassung solcher Fahrzeuge für den innerstädtischen Verkehr nicht vor 2050 zu erwarten. Da dies, erst am Ende meines betrachteten Zeithorizont eine Rolle spielen wird und der Effekt der

die Einführung von autonomen Fahrzeugen auf die Betriebskosten des Nutzers nicht eindeutig beziffert werden kann, verzichte ich auf eine Variation dieser Parameter. Somit bleiben die Einheitskosten des Fahrzeugbetriebs über den betrachteten Zeithorizont konstant. Zur Vereinfachung der Berechnung, werden die entstehenden Betriebskosten anhand der nachfolgenden Referenzwerte ermittelt. Die Kosten der Arbeitsstunden sowie die Kosten der Materialien werden zusammengefasst als die Einheitskosten EK_B für den Fahrzeugbetrieb. Diese betragen pro Auto 0.7 CHF pro km und pro Velo 0.15 CHF pro km (Quelle: TCS und eigene Erfahrungswerte).

Reisezeitkosten

Erleidet man beim Befahren einer Infrastruktur einen Zeitverlust, entsteht dem Nutzer ein Schaden. Zieht man in Betracht, dass der Nutzer in dieser Zeit hätte arbeiten können oder Freizeit verbringen, kann dieser Schaden monetär beziffert werden. Beispiele hierfür wären, die Mehrkosten eines Spediteurs aufgrund des Zeitverlust oder die Mehrkosten auf einem Ausflug, durch eine verpasste Verbindung. Diese Kosten werden indirekt vom Zustand des Fahrbahnbelags beeinflusst. Vom Zustand des Fahrbahnbelags ist die Reisegeschwindigkeit und somit die Zeit, die benötigt wird, eine gewisse Strecke zurückzulegen, abhängig.

Die Berechnung der totalen Reisezeitkosten K_{TT} erfolgt gemäss Formel 4.6 in Anlehnung an die Berechnung der *Travel time cost* aus Adey u. a. 2012, S.643.

$$K_{TT} = \sum_{t=0}^T \left[\sum_{j=1}^2 DTV_j \cdot t_j \cdot EK_{TT,j} \right] \cdot 365 \quad (4.6)$$

wobei:

- K_{TT} = Totale Reisezeitkosten für T Jahre
- t_j = Zeitverlust nach Fahrzeugtyp
- $EK_{TT,j}$ = Einheitskosten der verlorenen Zeit in CHF/h

Die Zeit, die man benötigt, eine bestimmte Strecke zurück zu legen, ist abhängig von der gefahrenen Geschwindigkeit v_j , welche wiederum durch Zustand der Strasse sowie von der Kapazität C_j der Infrastruktur, bestimmt wird. Diese Approximation ermöglicht es mir, die verlorene Zeit, gemäss 4.7 zu berechnen, wobei die Parameter α und β die Strasseneigenschaften repräsentieren.

$$t = \frac{s_k}{v_j} \left(1 + \alpha \left(\frac{DTV_j}{C_j} \right)^\beta \right) \quad (4.7)$$

wobei:

v_j = Gefahrene Geschwindigkeit nach Fahrzeugtyp

α = (0.15 vorgeschlagen nach (Adey u. a. 2012))

β = (4 vorgeschlagen nach (Adey u. a. 2012))

C_j = Kapazität der Infrastruktur pro Tag nach Fahrzeugtyp

Der Bahnübergang Brunnenstrasse ist aufgrund des regen S-Bahn Verkehrs und somit dichten Fahrplans am Bahnhof Uster, pro Stunde bis zu 40' geschlossen. Daraus resultiert, gemäss STEK pro Benutzer des Bahnübergangs eine durchschnittliche Wartezeit von bis zu 5 Minuten, was einem einem Zeitverlust von 0.0833 h /Fahrzeug entspricht. Um die durchschnittliche Wartezeit in die Berechnung der Reisezeitkosten miteinzubeziehen, wird der, beim befahren der Infrastruktur entstehende Zeitverlust t_j , um diesen Faktor vergrössert.

Der effektive beim benutzen des Bahnübergangs anfallende Zeitverlust nach Formel 4.7 ist somit hauptsächlich von der Schliesszeit der Bahnschranken abhängig.

Die durchschnittliche Wartezeit pro Nutzer, setzt sich aus der Zeit die ein Zug für die Durchfahrt benötigt und einem Faktor der die Zeit für die Öffnung der Schranken, sowie die Wartezeit aufgrund eines allfällige entstehenden Rückstaus repräsentiert, zusammen. Die durchschnittliche Durchfahrtszeit eines Zuges beträgt gemäss (Geschäftsfeld Stadtraum und Natur 2019) 3' und der vorgängig erläuterte Faktor wird für die Berechnung, nach konsultation verschiedener Literaturen, mit 2' angesetzt.

Die Einheitskosten des Zeitverlustes $EK_{TT,j}$ pro Velofahrer betragen 19.70 CHF/h . Um denn durchschnittlichen Auslastungsgrad von 1.6 Personen pro Auto zuberücksichtigen, wird dieser Wert mit dem Faktor 1.6 multipliziert. Somit betragen die Einheitskosten des Zeitverlustes für den motorisierten Individualverkehr 31.52 CHF/h pro Auto. (Adey u. a. 2012) (Bundesamt für Statistik / Bundesamt für Raumentwicklung 2017)

Die nachfolgenden Tabelle 4.3 fast die für die Nutzer anfallenden Einheitskosten zusammen.

	Reisezeitkosten $\frac{CHF}{h}$	Betriebskosten $\frac{CHF}{Pkm}$
Velo	19.70	0.15
MIV	31.52	0.7

Tabelle 4.3: Übersicht der Nutzerkosten

Umwelkosten

Die gemäss Formel 4.8 berechneten Kosten der Belastung der Umwelt K_E (*Englisch*: Environment), bestehen aus den Kosten durch die Schadstoffbelastung K_S und der Kosten durch die Lärmbelastung K_L . Sie repräsentieren die Schäden, die von der Allgemeinheit getragen werden, durch den motorisierten Individualverkehr an der Umwelt und

$$K_E = \sum_{t=0}^T \left(K_{L,t} + K_{S,t} \right) \quad (4.8)$$

wobei:

K_E = Totale Umweltkosten

$K_{L,t}$ = Kosten durch die Lärmbelastung pro Jahr

$K_{S,t}$ = Kosten durch die Schadstoffbelastung pro Jahr

Die **Lärmbelastung** durch den Verkehr verursacht Kosten K_L , die von der Allgemeinheit getragen werden. Die nach Formel 4.9 berechneten Kosten setzen sich einerseits aus den Mietzinsausfällen, da eine erhöhte Lärmbelastung zu einer Reduktion des Mietzins führt und andererseits aus den durch den Lärm verursachten Gesundheitskosten, zusammen. Diese Gesundheitskosten entstehen durch die Störung und Beeinträchtigung der Anwohner in Form von Kopfschmerzen, Bluthochdruck, Schlafstörungen sowie psychischer Belastung. (Ecoplan, VSS 2007)

$$K_{L,t} = EK_L \cdot DTV_{MIV,t} \cdot s_i \cdot 365 \quad (4.9)$$

wobei:

EK_L = Einheitskosten der Lärmbelastung pro Fahrzeugkilometer

$DTV_{MIV,t}$ = Durchschnittliche tägliche Verkehrsaufkommen im Jahr t

s_{MIV} = Zurückgelegte Distanz in $[km]$ pro Fahrzeug

Der Lärm entsteht mehrheitlich durch Motorengeräusche sowie der Abrollgeräusche der Reifen. Eine Schwierigkeit bei der bezifferung des Ausmasses dieser Kosten, ist die oben erwähnten Auswirkungen des Lärms auf die Allgemeinheit zu quantifizieren. (Adey u. a. 2012) Das Ausmass des entstandenen Schadens, ist somit vollständig von der Fahrzeugtechnologie abhängig. Eine Reduktion der Lärmbelastung durch Veränderung der Reifentechnologie, ist im betrachteten Zeit-horizont nicht zu erwarten. Die Einheitskosten der Lärmbelastung EK_L werden infolge, anhand des Berichts zu den externen Lärmkosten des Strassenverkehrs, mit 0.0149 CHF/Fahrzeugkilometer angenähert. (Bundesamt für Raumentwicklung 2004)

Die in Formel 4.10 dargestellten Kosten der **Schadstoffbelastung** K_S , sind die Kosten die der Allgemeinheit durch die Emissionen von Motorfahrzeugen entstehen. Diese Schäden können neben gesundheitlichen Problemen für die Anwohner und Nutzer der Strasse und der Beeinträchtigung des Pflanzenwachstums entlang der Infrastruktur auch die Reduktion des Werts einer Liegenschafts sein.

$$K_{S,t} = EK_S \cdot DTV_{MIV,t} \cdot s_i \cdot \left(1 - \Phi_{E-Auto,t}\right) \cdot 365 \quad (4.10)$$

wobei:

- EK_S = Einheitskosten der Schadstoffbelastung pro Fahrzeugkilometer
 $DTV_{MIV,t}$ = Durchschnittliche tägliche Verkehrsaufkommen des MIV im Jahr t
 s_{MIV} = Zurückgelegte Distanz in $[km]$
 $\Phi_{E-Auto,t}$ = Marktanteil E-Autos am $DTV_{MIV,t}$ im Jahr t

Die entstehenden Kosten der Schadstoffbelastung werden mehrheitlich durch die gefahrenen Geschwindigkeit und den Verkehrsfluss beeinflusst. So nimmt die Belastung der Luft durch Schadstoffe deutlich zu, wenn vermehrt im *Stopp and Go-Verkehr* gefahren wird. Da für das Modellieren dieser Beziehung im Rahmen meiner Untersuchungen nicht genügend Zeit zur Verfügung stand, bestimme ich die Kosten der Schadstoffbelastung anhand des Schlussberichts zu den externen Kosten im Strassenverkehr (Ecoplan, VSS 2007). Somit betragen die, für die Öffentlichkeit anfallenden Einheitskosten EK_S 0.0345 CHF/Fahrzeugkilometer.

Da elektronisch angetriebene Fahrzeuge keine Emissionen verursachen und demzufolge keine Kosten infolge Schadstoffbelastung, wird der Anteil an E-Autos $\Phi_{E-Auto,t}$ beim Berechnen der Umweltkosten vom täglichen Verkehrsaufkommen abgezogen.

	Umweltkosten $\frac{CHF}{Pkm}$
Schadstoffbelastung	0.0345
Lärmbelastung	0.0149

Tabelle 4.4: Übersicht der Nutzerkosten

Marktanteil E-Autos

Im Jahr 2019 betrug der Marktanteil der E-Autos am Personenwagenbestand in der Schweiz 0.621 %. Für das Jahr 2050 prognostiziere ich, nach konsultation verschiedenster Literaturen, dass der Marktanteil der E-Autos in der Schweiz bei 90 % zu liegen kommt. (BFS und ASTRA 2019)

Um die Berechnung zu vereinfachen nehme ich an, dass das Wachstum linear erfolgt. Somit beträgt der jährliche Anstieg des Marktanteils der E-Autos am Personenwagenbestand 2.88 %. Die Resultate meiner Berechnungen des jährlichen Marktanteils der E-Autos am Strassenfahrzeugbestand Φ_{E-Auto} ist in der nachfolgenden Abbildung 4.4 festgehalten.

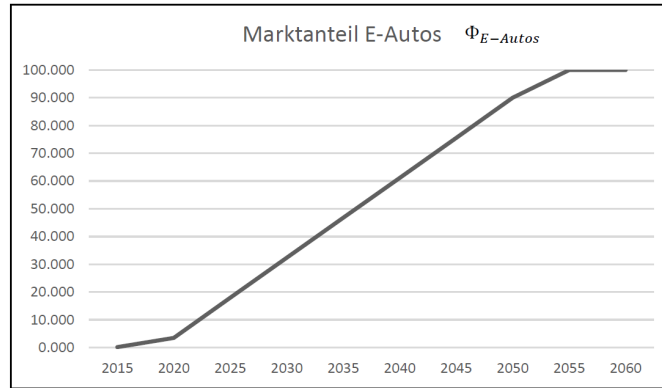


Abbildung 4.4: Marktanteils der E-Autos am Strassenfahrzeugbestand

Unfallkosten

Die totalen Unfallkosten K_A welche von der Allgemeinheit für den betrachteten Zeitraum getragen werden müssen, werden gemäss Formel 4.11 berechnet. So ergibt sich aus der Multiplikation der Anzahl Fahrzeuge und der Unfallwahrscheinlichkeit, die Anzahl Unfälle auf der Infrastruktur. Die Anzahl Unfälle multipliziert man, um die gesamten Unfallkosten zu ermittelt, mit den Einheitskosten der jeweiligen Unfalltypen.

In Betracht gezogen werden drei verschiedene Unfalltypen $[a,b,c]$. Unfälle mit entstandenen Sachschäden und leichtverletzten Personen werden in die Kategorie a eingeteilt. Für Unfälle mit schwerverletzten Beteiligten wird die Kategorie b definiert und für Unfälle mit Todesfolge die Kategorie c . Die Kategorien unterscheiden sich in der Häufigkeit des Unfalls pro Fahrzeug $\gamma_{j,n}$, sowie der entstehenden Einheitskosten pro Unfall $EK_{j,n}$.

Wichtig anzumerken ist, dass die ermittelten Unfallrisiken die Anzahl Unfälle eines Unfalltyps pro Personenkilometer darstellen. Das bedeutet, dass für die Berechnung der Personenkilometer der motorisierten Fahrzeuge, der Auslastungsgrad gemäss (Bundesamt für Statistik / Bundesamt für Raumentwicklung 2017) in Betracht gezogen werden muss. Somit wird in der Berechnung der Unfallkosten der DTV_{MIV} mit einem Faktor 1.6 multipliziert.

$$K_A = \sum_{t=0}^T \left[\sum_{j=1}^2 \left(\sum_{n=a}^c EK_{j,n} \cdot \gamma_{j,n} \right) \cdot DTV_j \cdot s_j \cdot 365 \right] \quad (4.11)$$

$$n = \begin{cases} a & \text{für } \textit{Sachschäden und Leichtverletzte} \\ b & \text{für } \textit{Schwerverletzte} \\ c & \text{für } \textit{Todesfall} \end{cases}$$

$$j = \begin{cases} 1 & \text{für } \textit{Velo} \\ 2 & \text{für } \textit{Auto} \end{cases}$$

wobei:

- K_A = Totale Unfallkosten
- $EK_{j,n}$ = Einheitskosten pro Unfall nach Fahrzeugtyp
- $\gamma_{j,n}$ = Unfallwahrscheinlichkeit nach Fahrzeugtyp
- DTV_j = Tägliches Verkehrsaufkommen nach Fahrzeugtyp
- s_j = Länge der Infrastruktur nach Fahrzeugtyp in km
- n = Unfallart
- j = Art des Fahrzeugs

Die Gefahrenlage auf der Infrastruktur wird von mir, durch die Berechnung der Unfallrisiken anhand der gesamtschweizerischen Unfalldaten, abgeschätzt. Die effektive Gefahrensituation wird, dadurch jedoch nicht berücksichtigt. Um diese berücksichtigen zu können,

müssten die Unfalldaten der Brunnenstrasse verwendet werden. Diese sind jedoch unvollständig und daher verwende ich zur Berechnung der Unfallrisiken die Unfalldaten für die ganze Schweiz. Da die Entwicklung der Verkehrssicherheit von verschiedensten Faktoren abhängig ist, habe ich mich im Rahmen dieser Untersuchungen aus Zeitgründen dazu entschieden, die Entwicklung der Unfallrisiken über den betrachteten Zeithorizont nicht zu variieren. Eine Untersuchung des Effekts der Veränderung der Unfallrisiken in Abhängigkeit der gebauten Variante erfolgt im Abschnitt 4.5.2.

Unfallrisiko

Das Risiko im Strassenverkehr einen Unfall zu erleiden, ist von verschiedenen Faktoren abhängig. Ich berechne das sogenannten Unfallrisiko, also die Wahrscheinlichkeit im Strassenverkehr einen Unfall zu erleiden, mit den Angaben zu den Leistungen des privaten Personenverkehrs auf der Strasse und der Strassenverkehrsunfall-Statistik. So teile ich die Anzahl Unfälle nach Unfallart, durch die Verkehrsleistungen der verschiedenen Verkehrsteilnehmer und erhalte so das Risiko eines Unfalls pro Personenkilometer. Diese Unfallwahrscheinlichkeit bezeichne ich mit $\gamma_{j,n}$.

Das Unfallrisiko des MIV ermittle ich aus den Unfallzahlen und den Verkehrsleistung der Personenwagen und der Motorräder in der Schweiz. Die Gesamtleistung der Personenwagen in der Schweiz, lag im Jahr 2018 bei 96.9 Mrd. Personenkilometer. Die Verkehrsleistung der Motorräder, inklusive Motorfahrräder und schnelle E-Bikes lag hingegen bei 2.2 Mrd. Personenkilometer. So ergibt sich für die den MIV eine Verkehrsleistung von 99.1 Mrd. Personenkilometer für das Jahr 2018. (Bundesamt für Statistik (BFS) 2019)

Die Unfallzahlen des MIV setzten sich aus den Unfallzahlen der Personenwagen, der Motorräder inklusive Motorfahrräder und schnelle E-Bikes zusammen. Im Jahr 2018 erlagen insgesamt 116 Personen den Folgen eines Unfalls mit Beteiligung des MIV, 1898 Personen wurden schwer- und 12'106 Personen leicht verletzt. (Bundesamt für Strassen ASTRA 2020)

Aus diesen Angaben habe ich die in Tabelle 4.5 aufgelisteten Unfallrisiken ermittelt, indem ich die Anzahl Unfälle durch die Verkehrsleistungen geteilt habe.

Für den Langsamverkehr, den ich unter dem Begriff *Velo* zusammenfasse, ergibt sich das selbe Vorgehen bei der Berechnung der Unfallrisiken. So lag die Verkehrsleistung im Jahr 2018, der Velofahrer und langsamen E-Bikes, bei 2'520 Mio. Personenkilometer. (Bundesamt für Statistik (BFS) 2019)

Im Jahr 2018 verunfallten in Zusammenhang mit dem Langsamverkehr, sprich mit den Velos oder den langsamen E-Bikes, 26 Personen tödlich. Im selben Zeitraum wurden 878 Personen schwer- und 2815 Personen leicht verletzt. (Bundesamt für Strassen ASTRA 2020) Wie für das Unfallrisiko des MIV habe ich aus diesen Angaben die Unfallrisiken der verschiedenen Unfalltypen für die Verkehrsteilnehmer des Langsamverkehrs ermittelt. Die berechneten Risiken sind in Tabelle 4.5 für die verschiedenen Fahrzeuge j und Unfalltypen n zusammengefasst.

Fahrzeugtyp	Unfalltyp a	Unfalltyp b	Unfalltyp c
MIV	$1.222 \cdot 10^{-7}$	$1.915 \cdot 10^{-8}$	$1.171 \cdot 10^{-9}$
Velo	$1.117 \cdot 10^{-6}$	$3.484 \cdot 10^{-7}$	$1.032 \cdot 10^{-8}$

Tabelle 4.5: Tabelle der Unfallrisiken $\gamma_{j,n} \left[\frac{\text{Unfälle}_{j,n}}{\text{Pkm}_j} \right]$

Nach der ausführlichen Betrachtung verschiedenster Literaturen zum Thema: *Kosten die durch Strassenverkehrsunfälle entstehen* und einem Gespräch mit Herr Dr. Martani, habe ich für die Berechnung der Unfallkosten im Rahmen dieser Untersuchung, die folgenden Einheitskosten der verschiedenen Unfalltypen festgelegt.

Kategorie a Die Einheitskosten pro Unfall der Kategorie *a* setzen sich aus den entstandenen Sachschäden und den Arbeits- und Materialkosten der Reparatur eines Fahrzeugs zusammen. Das durchschnittliche Alter eines Personenenwagens in der Schweiz liegt bei 8.5 Jahren und der durchschnittliche Wert eines solchen Fahrzeugs liegt gemäss TCS bei 15'000 CHF. Die Kosten der Behandlung der leichtverletzter Personen wird in dieser Betrachtung, aufgrund ihrer geringen Grösse vernachlässigt, weshalb die pro Unfall entstehenden Kosten der Kategorie *a* mit 15'000 CHF/Unfall angesetzt, werden.

Kategorie b Die Kosten die aufgrund eines Unfalls der Kategorie *b* entstehen, werden durch die anfallenden Behandlungskosten der verunfallten Person dominiert. Die Kosten durch den Erwerbsausfall für die Dauer der Arbeitsunfähigkeit, sowie die Kosten der entstandenen Sachschäden, werden in dieser Berechnung aufgrund ihrer im Vergleich zu den Behandlungskosten geringen Grösse, vernachlässigt. Die durchschnittliche Kosten die durch die Behandlung einer schwerverletzten Person entstehen, werden mit 110'000 CHF/Unfall angesetzt. Dies entspricht 3% der Kosten einer tödlich verunfallten Person.

Kategorie c Und zuletzt die Einheitskosten für die Folgen eines Unfalls der Kategorie *c*. Diese Kosten, für einen Unfall mit Todesfolge, basieren auf der Schätzung des Werts eines statistischen Lebens. Hierfür werden gemäss ASTRA 3.7 Mio. CHF/Unfall angesetzt.

	Unfallkosten $\frac{CHF}{Unfall}$
Kategorie <i>a</i>	15'000
Kategorie <i>b</i>	110'000
Kategorie <i>c</i>	3.7 Mio.

Tabelle 4.6: Übersicht der Nutzerkosten

4.2.1 Unsichere Einflussfaktoren

Der Verkehr, sprich das DTV, am Bahnübergang ist, von verschiedenen Einflussfaktoren abhängig. Die wichtigsten Einflussfaktoren sind nachfolgend aufgelistet. Alle diese Einflussfaktoren haben gemeinsam, dass das Ausmass, in dem sie den DTV in der Zukunft beeinflussen, ungewiss ist. Dieser Einfluss muss, um die Unsicherheit hinsichtlich der zukünftigen Mobilitätssituation am Bahnübergang berücksichtigen zu können, im Rahmen dieser Projektarbeit modelliert werden.

- Bevölkerungswachstum
- Zentrumsentwicklung und Verkehrsberuhigung
- Ausbau der Veloparkieranlagen am Bahnhof
- Aufwertung der Quartiere nördlich des Bahnhofs
- Urbane Strassenraumgestaltung im Zentrumsgebiet
- Förderung des Langsamverkehrs gemäss STEK
- Ausbau des Spital und der Sportanlage Buchholz

Da der Verkehr am Bahnübergang hauptsächlich aus Ziel- und Quellverkehr des Zentrums besteht, hat das Bevölkerungswachstum den grössten Einfluss auf das DTV am Bahnübergang. Gemäss der Angaben des Stadtentwicklungskonzept, kurz STEK, leben in Uster 35'000 Einwohner. Die zu erwartende Entwicklung der Bevölkerung, ist abhängig von verschiedenen Faktoren und demnach nur anhand von Prognosen vorhersagbar. Gemäss der Prognosen im STEK, wird der Wachstumstrend in der Zukunft anhalten und die kantonalen Vorgaben, sehen für Uster bis 2035 eine Bevölkerungszunahme um 7000 Einwohner vor. (Geschäftsfeld Stadtraum und Natur 2019)

Der Bau der Uster Westumfahrung, sowie der Bau der Moosackerstrasse haben gemäss STEK keinen nennenswerten Einfluss auf die Menge an Autos, die den Bahnübergang Brunenstrasse, in Zukunft passieren werden. Dies folgt der Annahme, dass die Umleitung des Durchgangsverkehr über die Oberlandstrasse bereits nahezu vollständig vollzogen ist und dass der gemessene DTV hauptsächlich aus Quell- und Zielverkehr ins Zentrum besteht. (Geschäftsfeld Stadtraum und Natur 2019)

4.3 Generierung möglicher Lösungen

Die Varianten beziehen sich auf das Kapitel 7.2.1 *Die Velostadt verbessern*. Es wurde im STEK bereits definiert welche Routen Hauptverbindungen darstellen und daher besondere Aufmerksamkeit, im Rahmen der Entwicklung Usters zu einer Velostadt verdienen. Die Abbildung 45 *Räumliche Umsetzung der Strategie "die Velostadt verbessern"* im STEK Kap. 7 zeigt die Haupt- und Nebenrouten für den Veloverkehr im Raum Uster. Auf dieser Abbildung wird die zentrale Bedeutung der Route Bahnhof - Sportanlage als wichtige Nord-Süd Achse verdeutlicht. Die hier ausgearbeiteten Varianten bestimmen die Rahmenbedingungen die für die Berechnung der Kosten der Optimierung vonnöten sind. Die verschiedenen Möglichkeiten zur Ausgestaltung der Fahrbahn kann der Tabelle 1 im STEK Schlussbericht Kapitel 7.2 *Uster fördert den Fuss- und Veloverkehr* entnommen werden. Die Tabelle 1 im STEK Schlussbericht Kapitel 7 basiert auf den kantonalen Vorgaben.

Die Kapazität für den ÖV ist in keiner Variante beeinträchtigt. Einen Ausbau der Kapazität ist nicht geplant. Neubauten oder umstrukturierungen verschiedener Bushaltestellen ist im Rahmen der genaueren Bauausführung zu prüfen.

Der Bau der Westerschliessung ist im Rahmen der Entwicklung Usters zur Velostadt unerlässlich und ist zentral für die geplante umstrukturierung entlang der Route Bahnhof - Sportanlage.

4.3.1 Variante: 1

Diese Variante beinhaltet den Bau der geplanten Velo- und Fussgängerunterführung im Bereich der Gleisquerung bei der Bahnhof-/ Brunnenstrasse. Weitere Investitionen sind in diesem Rahmen nicht geplant. Die Ausführung der Velounterführung ist in verschiedenen Kapazitätsgrössen zu untersuchen. Es soll in Betracht gezogen werden, dass die Velounterführung als Flaschenhals in der Nord-Süd Achse fungiert und es ist somit zu untersuchen welche Querschnittskapazitäten für welche Nachfragebeziehungen vonnöten sind um Verstopfungen aufgrund von Überbelastungen zu vermeiden. Die Bestimmung der optimalen Kapazität ist abhängig von der zukünftigen Verkehrsmenge und dadurch mit einer Unsicherheit behaftet die es zu modellieren gilt.

4.3.2 Variante: 2

Die zweite von mir untersuchte Variante beinhaltet neben der Velounterführung einen Ausbau der Infrastruktur auf der Brunnenstrasse und der Pfäffikerstrasse bis zur Sportanlage Buchenholz. Dies ist im Rahmen der gängigen Ausbaustandards für Velowege als Hauptrouten gemäss STEK Kap.7 Tab.1 auszuführen.

4.3.3 Variante: 3

Die dritte Variante ist eine geplante Veloschnellroute. Diese zeichnet sich durch separate und baulich von der restlichen Fahrbahn getrennte Radwege aus. Dies ermöglicht gemäss STEK eine komfortable, durchgehende und direkte Verbindung mit allenfalls zu prüfender

Vortrittsberechtigung. Die Infrastruktur dieser Radwege sollte ausschliesslich für diese Art von Verkehr zugelassen sein und gemäss STEK Kap.7 Tab. 1 mind. 4.8m breit sein. Um eine kreuzungsfreie Durchfahrt zu gewährleisten ist eine Ausführung in Anlehnung an den Aufbau einer Autobahn zu prüfen. Das Ziel dieser Infrastruktur ist es grössere Distanzen in kurzer Zeit und mit hoher Geschwindigkeit unmotorisiert zurück legen zu können. Dies setzt eine kreuzungsfreie Ausführung voraus was mit baulichen Massnahmen oder Vortrittsberechtigungen erreicht werden kann. Die dritte Variante ist an ein Beispiel aus dem Ausland angelehnt. Die Infrastrukturintervention wäre ein Ausbau der Nord-Süd Achse entlang der Pfäffikerstrasse, Brunnen- und Bahnhofstrasse zu einer Veloschnellstrasse. Das Vorbild dieser Infrastruktur ist die C99, Kopenhagen-Albertslund eine sogenannten *Super-Radschnellroute* auch bekannt als *Cykelsuperstier*. Diese Art von Veloinfrastruktur hat sich bereits in Dänemark bewehrt um das Pendeln leichter und sicherer zu machen. In Anbetracht der enormen Kapazitätssteigerung wäre ein Ausbau der Parkplätze auf der Sportanlage Buchenholz zu prüfen. Dies wäre im Rahmen eines Programmes gedacht das sich *Ride and Bike* nennen könnte, welches zum Ziel hat die Kombination von Autobahnanschluss und Parkiermöglichkeit mit einer bequemen, sicheren und schnellen Veroverbindung ins Stadtzentrum zu fördern.

Der geplanten Stadterschliessungen West und Süd-Ost sind für die Förderung des Langsamverkehrs in der Stadt Uster von zentraler Bedeutung. So kann eine Entlastung des Zentrums und der Nord-Süd Achse entlang der Bahnhofstrasse nur realisiert werden wenn der MIV entlang der Westumfahrung um das Stadtzentrum herum geführt wird.

In Tabelle 4.7 werden die Eigenschaften der Varianten zusammengefasst.

Eigenschaften	Variante 1	Variante 2	Variante 3
Länge Fahrbahn (m)	80	80	80
Länge Unterführung (m)	-	55	65
Velospuren:	2	2	4
Fahrbahnen	2	2	1
Breite eines Veloweg (m):	1.5	1.5	2
Breite einer Fahrbahn (m):	3.5	3	5
Tempolimit ($\frac{km}{h}$)	50	30	30
Ø Geschwindigkeit ($\frac{km}{h}$)			
• Velo	15	15	20
• MIV	37	30	30
Kapazität ($\frac{Fahrzeug}{h}$)			
• Veloweg	3350	3767	4600
• Strasse	2500	2500	1250

Tabelle 4.7: Basis Informationen der Varianten

4.4 Analyse der Lösungen

Um den Vergleich der Varianten, zur Bestimmung der optimalen Lösungen, durchführen zu könne, müssen die Kosten anhand der unter Abschnitt 4.2 dargestellten Formeln, berechnet werden. Um die Kosten über einen Zeitraum von vierzig Jahren berechnen zu könne, muss der Einfluss der unter Abschnitt 4.2.1 bestimmten Faktoren, auf das DTV modelliert werden und somit der DTV für die Zukunft geschätzt werden. Dies geschieht anhand der nachfolgend vorgestellten Szenarien.

4.4.1 Modellierung des DTV

Den Effekt der das Bevölkerungswachstum auf den DTV_{MITV} sowie auf den DTV_{Velo} haben wird, untersuche ich anhand der im nachfolgenden Abschnitt ?? dargestellten Szenarien. Den Effekt der die Umsetzung der Leitziele des STEK bis 2035 auf den Langsamverkehr haben wird fasse unter dem Stichpunkt *Umsetzung der STEK* zusammen. Dieser umfasst die Einflüsse welche die Entwicklung des Zentrums, der Ausbaus der Veloparkieranlage am Bahnhof, die Aufwertung der Quartiere nördlich des Bahnhofs und die Massnahmen der Stadt Uster zur Förderung des Langsamverkehrs, sowie der Ausbaus des Spitals auf den DTV_{Velo} haben werden.

Da diese Effekte zur gleichen Zeit wirken, muss eine bei der Berechnung der Kosten der Varianten eine Kombination der gebildeten Szenarien betrachtet werden. Gemäss des unter Abschnitt 2.4 vorgestellten Entscheidungsbaum und dem Beispiel in Abbildung 2.2, wird dies in der nachfolgenden Abbildung 4.5 dargestellt. Dies stellt zugleich einen Ausschnitt aus dem Entscheidungsprozess, zur Bestimmung der optimalen Lösung, dar.

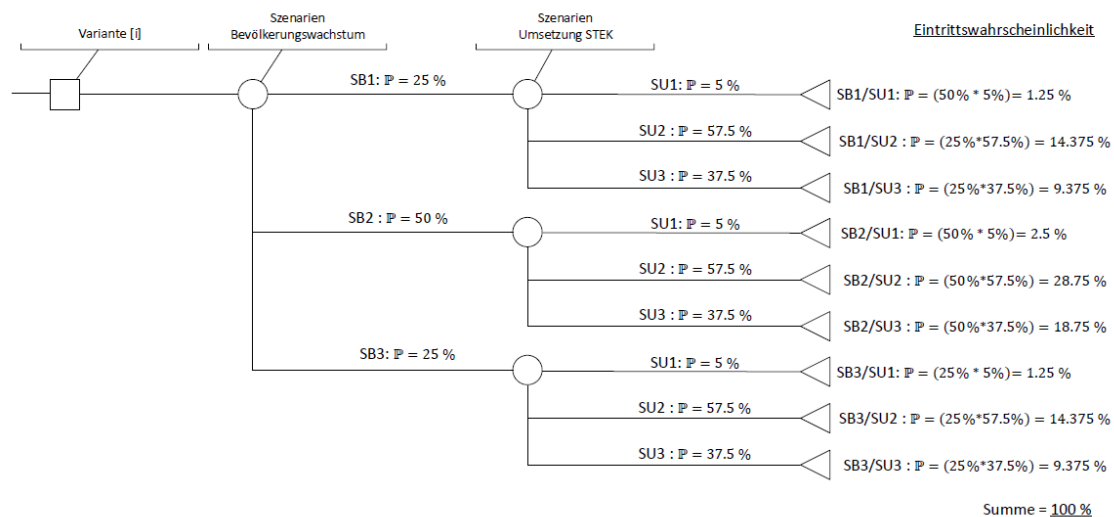


Abbildung 4.5: Übersicht über die Szenarien und ihre Eintrittswahrscheinlichkeiten

Bevölkerungswachstum

Wie unter Abschnitt 4 erwähnt, ist das DTV abhängig von der zukünftigen demographischen Entwicklung. Um den Effekt den das Bevölkerungswachstum auf das DTV haben wird, modellieren zu können orientiere ich mich an den Wachstumsprognosen. Die zu erwartende Bevölkerungsentwicklung habe ich dem Kapitel 3 *Stadt Uster im Porträt* des STEK Schlussbericht entnommen und wird nachfolgend kurz beschrieben. Anhand dieser Beschreibung und unter der Annahme eines linearen Wachstums berechne ich das DTV für den MIV und den Langsamverkehr, sprich die Velofahrer.

Stagnation

Geschätzte Anzahl an Einwohner im Jahr 2035 beträgt 38'760, somit wächst die Bevölkerung jährlich um 188 Einwohner bzw. um 0.5% gegenüber 2015

Trend restriktiv

Geschätzte Anzahl an Einwohner im Jahr 2035 beträgt 42'260, somit wächst die Bevölkerung jährlich um 363 Einwohner bzw. um 1% gegenüber 2015

Trend Prosperität

Geschätzte Anzahl an Einwohner im Jahr 2035 beträgt 45'620, somit wächst die Bevölkerung jährlich um 531 Einwohner bzw. um 1.5% gegenüber 2015

Anhand dieser Wachstumsprognosen, bilde ich die drei nachfolgend dargestellten Szenarien. Mit diesen Szenarien werde ich in einem nächsten Schritt den zukünftigen DTV am Bahnübergang Brunnenstrasse ermitteln.

- Szenario: SB 1
 - Grundlage: Stagnation \Rightarrow jährliches Wachstum um 0.5%
 - Eintrittswarscheinlichkeit: 25%
- Szenario: SB 2
 - Grundlage: Trend restriktiv \Rightarrow jährliches Wachstum um 1 %
 - Eintrittswarscheinlichkeit: 50%
- Szenario: SB 3
 - Grundlage: Trend Prosperität \Rightarrow jährliches Wachstum um 1.5%
 - Eintrittswarscheinlichkeit: 25%

Die Wahrscheinlichkeit das Szenario SB 2 eintritt und der DTV jährlich um 120 Fahrzeuge zunimmt, bewerte ich mit 50%. Dies geschieht unter der Annahme, dass der restriktive Trend das minimale Wachstumsziel von 20% widerspiegelt, welches gemäss dem STEK mit grösster Wahrscheinlichkeit eintreten wird und das dieses Szenario dem kantonalen Prognosen entspricht. Das es zu einem verstärktem Wachstum von 1.5% und somit zu einer Zunahme von 180 Fahrzeugen am DTV pro Jahr kommt, erachte ich nach den Angaben des STEK als unwahrscheinlich, da ein übermässiges Bevölkerungswachstum, aufgrund der nur beschränkt vorhandenen Kapazitäten zur Erweiterung der Wohnangebots, nur bedingt möglich ist. Das es zu einer Stagnation des Bevölkerungswachstums und im Zuge dieser

Modellierung zu einem Verkehrswachstum von 0.5% und einer Zunahme von 60 Fahrzeugen am DTV pro Jahr, kommt, erachte ich in Anbetracht der Prognosen zur demographische Entwicklung im Kanton Zürich, als unwahrscheinlich. Deshalb bewerte ich die Szenarien SB 1 und SB 3 mit jeweils 25%.

Mithilfe der verschiedenen Wachstumsraten WR_s der Szenarien und der Formel 4.4.1 berechne ich das DTV_i im Jahr t_i .

$$DTV_i = DTV_{2016} + (t_i - t_{2016}) \cdot [WR_s] \cdot DTV_{2016}$$

Gemäss GIS-Browser lag der durchschnittliche Werkverkehr im Jahr 2016 bei 12'023 Fahrzeugen. Diesen Wert benutzte ich als Startwert sowie Basiswert meiner Berechnungen. Da die Anzahl Velos, die den Bahnübergang an der Brunnenstrasse täglich passieren, nicht von einer Verkehrsmessstelle gezählt wird, muss diese Information aus der Menge an Autos hergeleitet werden. Dies erfolgt mithilfe der Daten der Verkehrsmessstelle an der etwas südlich von Uster gelegenen Seefeldstrasse, welche Niederuster mit Riedikon verbindet. Der im Jahr 2019 gemessene durchschnittliche DTV lag bei 8818 Motorfahrzeugen und 913 Velofahrer. Daraus ergibt sich einen Veloanteil von 10.35%.¹²

$$\mu = \frac{DTV_{Velo, Seefeldstrasse}}{DTV_{MIV, Seefeldstrasse}}$$

$$DTV_{Velo} = DTV_{MIV} \cdot \mu_{Velo}$$

In den Abbildung 4.6 sind die Ergebnisse meiner Modellierung des DTV am Bahnübergang Brunnenstrasse dargestellt. Mit diesen Werten habe ich die Berechnung der Kosten und schlussendlich die Optimierung der Zielfunktion vorgenommen.



Abbildung 4.6: Tägliches Verkehrsaufkommen Brunnenstrasse

1. Kanton Zürich 2019b.
2. Kanton Zürich 2019c.

Umsetzung der STEK

Den Effekt der die Umsetzung der Leitziele der STEK auf den täglichen Velo-Mehrverkehr haben wird, modelliere ich anhand der folgenden Szenarien. Das meines erachtens mit der grössten Wahrscheinlichkeit eintretende Szenario, entspricht der Verkehrsprognose des Bundes, die eine Zunahme der Verkehrsleistung des Langsamverkehrs bis 2040 gegenüber 2010, um 32% erwartet. (Bundesamt für Raumentwicklung 2016) Um die Ober- sowie Untergrenze meiner Prognose ermitteln zu können, orientiere ich mich ein weiteres mal an dem STEK. Mithilfe der unter Kapitel 10 *Stadt Uster im Porträt* des STEK vorgestellten Wachstumsprognosen für die Bevölkerungsentwicklung sowie der in Kapitel 7 *Mobilität* der STEK gemäss regionalem Richtplan erstellten Verkehrsprognose für den Anteil der Velofahrer am Gesamtverkehr, erstelle ich zwei weitere Szenarien. Einerseits berücksichtige ich den Fall einer ungenügenden Umsetzung der Leitziele und der daraus resultierenden stagnierenden Entwicklung des Veloverkehr. Andererseits den Fall einer maximalen Umsetzung aller Ziele in Verbindung mit einer Verschiebung des Innerstädtischen Modal-Split in Richtung Langsamverkehr.

Stagnation

Prognose gemäss STEK: → jährliches Wachstum: 0.54 %

Verkehrsperspektiven 2040

Prognostizierte Zunahme der Verkehrsleistung: 32% → jährliches Wachstum: 1.3

Umsetzung maximal

Prognose gemäss STEK und regionalem Richtplan: → jährliches Wachstum: 2 %

Das Eintreten einer Stagnation erachte ich, unter Berücksichtigung der Entwicklung des Langsamverkehr über die letzten zehn Jahre, als unwahrscheinlich und bewerte diese Prognose daher mit 5%. Das es zu einem Wachstum gemäss der Prognose des Bundes kommen wird, erachte ich nach der Konsultation weitere Verkehrsprognosen, als das Szenario, welches mit grösster Sicherheit eintreten wird. Daher bewerte ich diese Szenario mit einer Eintrittswahrscheinlichkeit von 57.5%. Das alle Ziele maximal erfüllt werden und eine Verschiebung des Innerstädtischen Modal-Split statt findet, erachte ich mit 32.5% als deutlich plausibler als die Stagnation, jedoch als unwahrscheinlicher als die Prognose des Bundes.

- Szenario: SU 1
 - Grundlage: Stagnation
 - Eintrittswahrscheinlichkeit: 5%
- Szenario: SB 2
 - Grundlage: Verkehrsperspektiven 2040
 - Eintrittswahrscheinlichkeit: 57.5%
- Szenario: SB 3
 - Grundlage: Umsetzung maximal
 - Eintrittswahrscheinlichkeit: 32.5%

Anhand der zu Beginn dieses Abschnitts definierten Wachstumsraten, ausgehend von den Messwerte des täglichen Veloverkehr im Jahr 2016, habe ich die Anzahl Velos, die in jedem Szenario zusätzlich pro Tag auf der Infrastruktur unterwegs sein werden, ermittelt. Die Anzahl Velos die im Jahr 2016 täglich den Bahnübergang nutzten, lag, gemäss Abschnitt ??, bei 1245. Somit führt das Szenario SU 1 zu einer Erhöhung des täglichen Veloverkehr um 7 Velos, das Szenario SU 2 zu einer Zunahme von 16 Velos und das Szenario SB 3 zu einer Erhöhung des tägliche Veloverkehrs um 25 Velos. Mit diesen Angaben berechne ich die Anzahl Velos, die je nach Szenario, zusätzlich zu den in Abschnitt ?? berechneten DTV-Werten, auf der Infrastruktur unterwegs sein werden.

4.4.2 Berechnung der Kosten der Varianten

Die Abbildung 4.7 zeigt die Kostenberechnung der ersten 8 Jahre am Beispiel der Variante 1 im Szenario SB1/SU1. Die jährlichen DTV Werte sind gemäss dem Abschnitt 4.4.1 berechnet und die Reisezeitverluste t gemäss Abschnitt 4.2.

Nach 4.2 werden die Unterhaltskosten, bestehend aus Bau- und jährlichen Wartungskosten berechnet. Die Berechnung der Wartungskosten erfolgt mit den in Abschnitt ref• beschriebenen Abmessungen der Variante. Die im Jahr 2020 anfallenden Interventionskosten belaufen sich gemäss Abschnitt ref• auf 68'000 CHF.

Die Betriebskosten der Nutzer sind gemäss Abschnitt 4.2 berechnet. Die Berechnung erfolgt durch die Multiplikation des DTV mit der Länge der jeweiligen Fahrbahn und den Einheitskosten des Fahrzeugbetriebs. Um die Kosten eines Jahres zu ermitteln, wird der berechnete Wert mit 365 multipliziert. Die weiteren Kosten der Nutzer sind die Reisezeitkosten, die nach Abschnitt 4.2 berechnet werden. Hierfür wird der im oberen Bereich der Tabelle dargestellte Zeitverlust pro Nutzer, berechnet aus dem Zeitverlust, der durch das Befahren der Infrastruktur, gemäss Formel ??, und durch die durchschnittliche Wartezeit aufgrund der Bahnschranke gemäss Abschnitt 4.2, entsteht, mit dem DTV und den Einheitskosten des Zeitverlust, multipliziert. Die Berechnung des Zeitverlust nach Formel ?? ist abhängig von der Kapazität, der Annahme zur gefahrenen Durchschnittsgeschwindigkeit und der Längen der Variante.

Die Berechnung der Umweltkosten erfolgt nach Abschnitt 4.2. Diese setzen sich zusammen aus, den Lärm- und Schadstoffbelastungskosten. Die Berechnung erfolgt jeweils, durch die Multiplikation des DTV mit den jeweiligen Einheitskosten und der Länge der Fahrbahn. Im Fall der Schadstoffbelastungskosten wird, vom MIV DTV der jährliche E-Auto Anteil abgezogen.

Die Berechnung der Unfallkosten erfolgt durch die Multiplikation des DTV mit der Länge der Fahrbahn den Unfallrisiken gemäss Abschnitt 4.2. Dies erfolgt pro Unfallkategorie. Daraus ergibt sich die jeweilige Unfallanzahl nach Unfallart. Diese werden mit den Einheitskosten der jeweiligen Unfallart multipliziert und die berechneten Kosten, um die totalen Unfallkosten zu ermitteln, aufsummiert.

4 Fallstudie

Variante: 1 Szenario: SB2/SU2	Jahr:	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027
	DTV_{MY}	12384	12504	12624	12744	12865	12985	13105	13225	13346
	$t_{MY} [h]$	0.08549608	0.08549611	0.08549613	0.08549616	0.08549618	0.08549621	0.08549623	0.08549626	0.08549629
	DTV_{Velo}	1298	1311	1323	1336	1348	1360	1373	1385	1398
	$t_{Velo} [h]$	0.088666667	0.088666667	0.088666667	0.088666667	0.088666667	0.088666667	0.088666667	0.088666667	0.088666667
Besitzer	Unterhaltskosten	-	72'000	4'000	4'000	4'000	4'000	4'000	4'000	4'000
Nutzer	Betriebskosten	258809	261321	263833	266345	268857	271369	273881	276393	278905
	Reisezeitkosten	13008470	13134670	13260870	13387070	13513271	13639472	13765673	13891874	14018075
Öffentliche Hand	Umweltkosten	17'527	17'257	16'984	16'707	16'426	16'143	15'855	15'564	15'270
	Unfallkosten	8320	8400	8481	8561	8641	8722	8802	8883	8963
	Totale Kosten pro Jahr	CHF 13'354'619	CHF 13'230'261	CHF 13'226'384	CHF 13'290'503	CHF 13'354'619	CHF 13'418'731	CHF 13'482'840	CHF 13'546'946	CHF 13'611'048
Gesamtkosten bis 2060	CHF 721'119'073									

Abbildung 4.7: Beispiel der Kostenberechnung

4.5 Bewertung der Lösungen

Die im vorangegangenen Abschnitt berechneten Kosten der Varianten sind abhängig vom jeweiligen Szenario. Da die

Gewichtung der Szenarien mit dem Eintrittswahrscheinlichkeit...

4.5.1 Berechnung der Risiken der Varianten

Dieser Abschnitt beschreibt die Berechnung der Risiken mit den Entscheidungsbäumen. -Kombination der berechneten Kosten mit den Eintrittswahrscheinlichkeiten -> ergibt die Risiken der Varianten -Summe aller Risiken ergibt das Risiko der Variante selbst. Darstellen der Szenarien mit ihren Eintrittswahrscheinlichkeiten

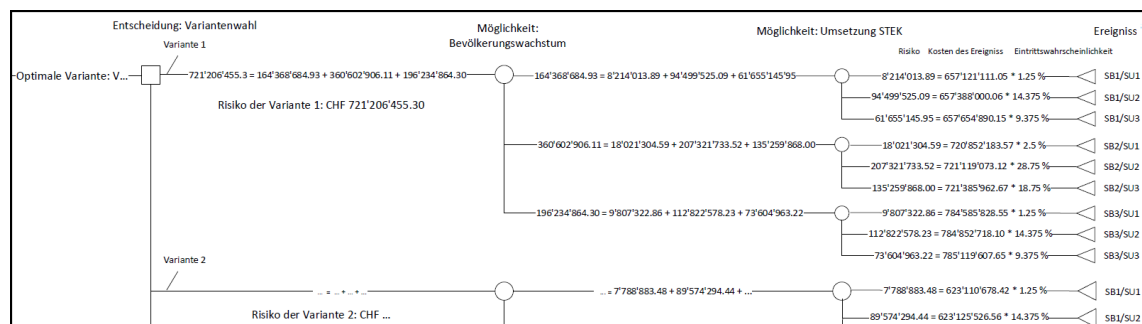


Abbildung 4.8: Beispiel der Risikoberechnung

4.5.2 Sensitivitätsanalyse

Dieser Abschnitt beschreibt die drei durchgeführten Sensitivitätsanalyse. Was der sinn der Aufteilung ist und einleiten wie ich die analysen beschreiben werde.

Zustand 0

Zustand 1

Zustand 2

Zustand 3

5 Resultate

Hier werden die Resultate dargestellt. Ohne Wertung.

6 Diskussion

Hier werden die Resultate diskutiert.

7 Schlussfolgerung und Ausblick

Hier wird die Schlussfolgerung aus der Diskussion der Resultate gezogen.

Somit kann die geplante Veloroute eine Reduktion der Belastung der Öffentliche Hand, in Form der Reduktion der Schadstoffemission, erreichen. Die Schwierigkeit diese Kosten zu modellieren liegt in der nicht direkt messbaren Beziehung zwischen Schadstoffbelastung und daraus resultierenden Kosten. Jedoch ist zu vermerken das die Emissionen direkt von der Anzahl an motorisierten Fahrzeuge abhängt die auf der Infrastruktur verkehren.

Literaturverzeichnis

- Adey, B. T. 2019. „Unterrichtsmaterial von Systems Engineering“.
- Adey, B. T., T. Herrmann, K. Tsafatinos, J. Lüking, N. Schindele und R. Hajdin. 2012. „Methodology and base cost models to determine the total benefits of preservation interventions on road sections in Switzerland“. *Structure and Infrastructure Engineering* 8 (7): 639–654. doi:10.1080/15732479.2010.491119. eprint: <https://doi.org/10.1080/15732479.2010.491119>. <https://doi.org/10.1080/15732479.2010.491119>.
- Adey, Bryan T., Marcel Burkhalter und Claudio Martani. 2019. „Defining road service to facilitate road infrastructure asset management“. *Infrastructure Asset Management*, Nr. 0: 1–16. doi:10.1680/jinam.18.00045. eprint: <https://doi.org/10.1680/jinam.18.00045>. <https://doi.org/10.1680/jinam.18.00045>.
- BFS und ASTRA. 2019. „Strassenfahrzeugbestand (MFZ)“. <https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/mobilitaet-verkehr/verkehrsinfrastruktur-fahrzeuge/fahrzeuge/strassenfahrzeuge-bestand-motorisierungsgrad.html>.
- Bundesamt für Raumentwicklung. 2004. „Externe Lärmkosten des Strassen- und Schienenverkehrs der Schweiz, Aktualisierung für das Jahr 2000, Bern“.
- . 2016. „Verkehrsperspektiven 2040“. *Entwicklung des Personen- und Güterverkehrs in der Schweiz*.
- Bundesamt für Statistik (BFS). 2019. „Leistungen des privaten Personenverkehrs auf der Strasse“. *Methodenbericht 2019*. <https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/aktuell/neue-veroeffentlichungen.assetdetail.9867227.html>.
- Bundesamt für Statistik / Bundesamt für Raumentwicklung. 2017. „Verkehrsverhalten der Bevölkerung“. *Ergebnisse des Mikrozensus Mobilität und Verkehr 2015*.
- Bundesamt für Strassen ASTRA. 2020. *Strassenverkehrsunfall-Statistik 2010 - 2019*. Technischer Bericht.
- Chicago Press, University of. 2010. *The Chicago Manual of Style*. Chicago Manual of Style. University of Chicago Press. ISBN: 9780226104201.
- Ecoplan, VSS. 2007. „Externe Kosten im Strassenverkehr“. *Grundlagen für die Durchführung einer Kosten-Nutzen-Analyse*. <https://ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/baug/ivt/ivt-dam/vpl/vss-ek/2005-204.pdf>.
- Esders, Miriam, Nicola Morte und Bryan Adey. 2015. „A Methodology to Ensure the Consideration of Flexibility and Robustness in the Selection of Facility Renewal Projects“. *International Journal of Architecture, Engineering and Construction* 4 (September). doi:10.7492/ICSMD.2015.013.

- Geschäftsfeld Stadtraum und Natur. 2019. *Stadtentwicklungskonzept STEK*. Stadt Uster. <https://www.uster.ch/publikationen/229951>.
- Kanton Zürich. 2019a. „GIS-Browser Kanton Zürich“. <https://maps.zh.ch/>.
- . 2019b. „Strassenverkehrszählung Uster (ZH0787), Seefeldstrasse (Route Nr. 744) (787)“. *Daten*. <https://maps.zh.ch/system/docs/verkzaehlstellen/1119.pdf>.
- . 2019c. „Veloverkehrszählung Uster (ZH1119), Radweg, (1119 Uster) Alltagsroute (05 038)“. *Jahresreport*. <https://maps.zh.ch/system/docs/verkzaehlstellen/787.pdf>.
- Kontextplan AG, Chrisina Farner, Markus Hofstetter. 2010. *Baukosten der häufigsten Langsamverkehrsinfrastrukturen*. Hrsg. Bundesamt für Strassen (ASTRA).
- Martani, Claudio, Laurent Cattarinussi und Bryan T. Adey. 2018. „A new process for the evaluation of the net-benefit of flexible ground-floor ceiling in the face of use transition uncertainty. The application case of an office building in London“ [auf en]. *Journal of Building Engineering* (Amsterdam), Journal of Building Engineering, 15:156–170. ISSN: 2352-7102. doi:10.1016/j.jobe.2017.11.019.
- Neufville, Richard de, und Stefan Scholtes. 2011. *Flexibility in Engineering Design*. Januar. ISBN: 9780262303569. doi:10.7551/mitpress/8292.001.0001.
- Nowak, Andrzej S., und Kevin R. Collins. 2000. *Reliability of Structures*. First edition. McGraw-Hill civil engineering series. Boston: McGraw-Hill Higher Education. ISBN: 9780070481633.
- Stewart, Mark G. 2009. „Mechanical behaviour of pitting corrosion of flexural and shear reinforcement and its effect on structural reliability of corroding RC beams“. *Structural Safety* 31 (1): 19–30. ISSN: 0167-4730. doi:10.1016/j.strusafe.2007.12.001.

Anhang

A.1 Unfallrisiko Schätzung

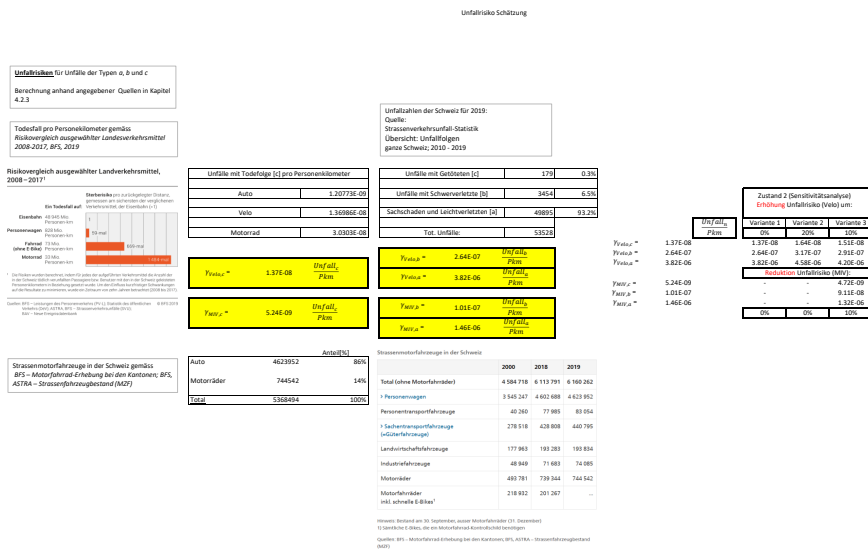


Abbildung A.1: Berechnung des Unfallrisiko